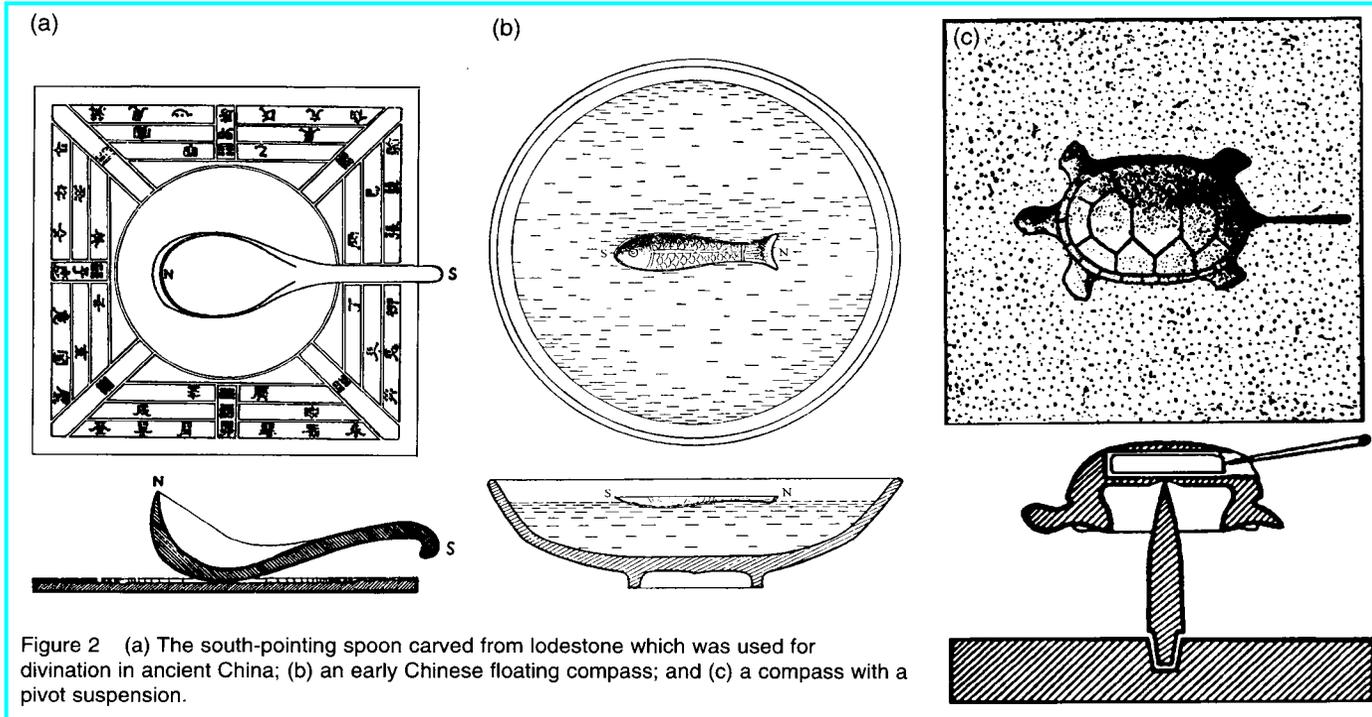


Inhalt der Vorlesung (28.06.2010)

- 1) Kristallstrukturen
- 2) Beugung und Strukturbestimmung
- 3) Mehrstoffsysteme
- 4) Makroskopische Eigenschaften von Festkörpern, und Grenzflächen und ihre Bestimmung
 - Metalle
 - Halbleiter
 - Mechanische Eigenschaften
 - Thermische Eigenschaften
 - ***Magnetische Eigenschaften***

Vom Magnetkompass zur Festplatte



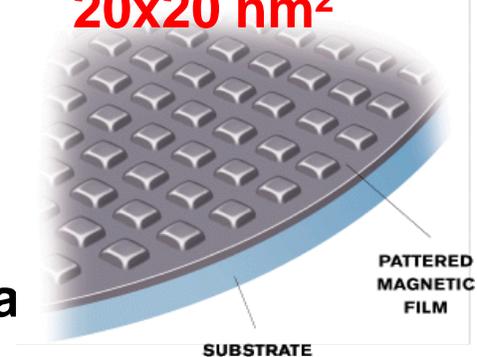
1 Tbit/inch²
1 Dipol = 1 bit
20x20 nm²



HDD



Patterned media



Dauermagnete - Historische Entwicklung

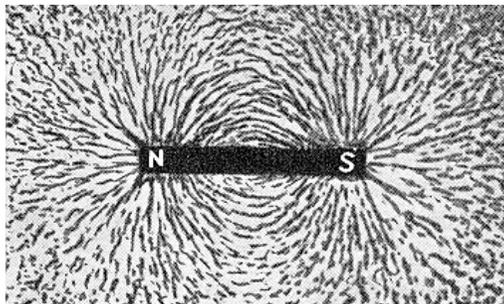
- B.C. China → Magneteisenstein (Magnetit), magnetischer Draht,
- 1086 **Shen Kua** → Kompass in China
- 1187 **Neckam**, „de utensilibus“, „de naturis rerum“, Kompass in Europe
- 1600 **Gilbert**, „de magnete“, Dauermagnet
- 1730 **Savery**, first powerful permanent magnet
- 1743 **Dietrich/Bernoulli**, Hufeisenmagnet
- 1750 **Knight**, Fe-Oxid Magnet
- 1825 **Sturgeon**, Elektromagnet
- 1931 **Mishima**, AlNiCo-Magnet
- 1940 Hartferrit
- 1966 **Strnat**, Selten Erd (Rare Earth) -cobalt Magnet
- 1983 **Sagawa, Herbst and Croat, Hadjipanayis**, RE-Fe-B Magnet



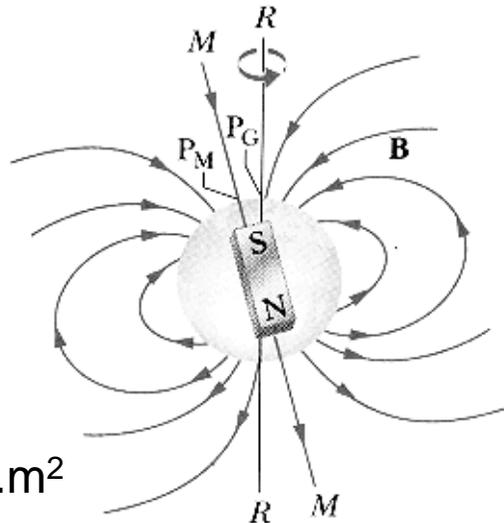
250 years of progress in magnet technology - the lodestone, ferrite and Nd-Fe-B magnets each produce half a Joule of magnetic energy, yet the size of the magnet has decreased a thousandfold. (Photo: Coey, Trinity College Dublin.)

Magnetische Eigenschaften

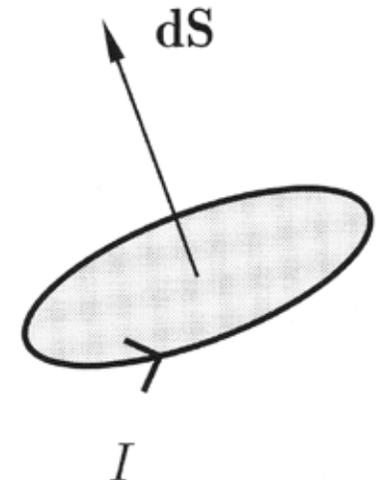
- § lassen sich auf *magnetische Momente* und ihren *Wechselwirkungen* zurückführen.
- § unterschiedliche Formen der Wechselwirkung führen zu den verschiedenen Arten der magnetischen Erscheinungen.
- § Der fundamentale Baustein der magnetischen Eigenschaften ist der *magnetische Dipol* und das damit verbundene magnetische Moment.



$$m_{\text{erde}} = 8.0 \times 10^{22} \text{ A} \cdot \text{m}^2$$



$$\boldsymbol{\mu} = i \cdot d\mathbf{S} \quad \left[\frac{\text{A} \cdot \text{m}^2}{\text{A}} \right]$$



Bohrsches Magneton μ_B

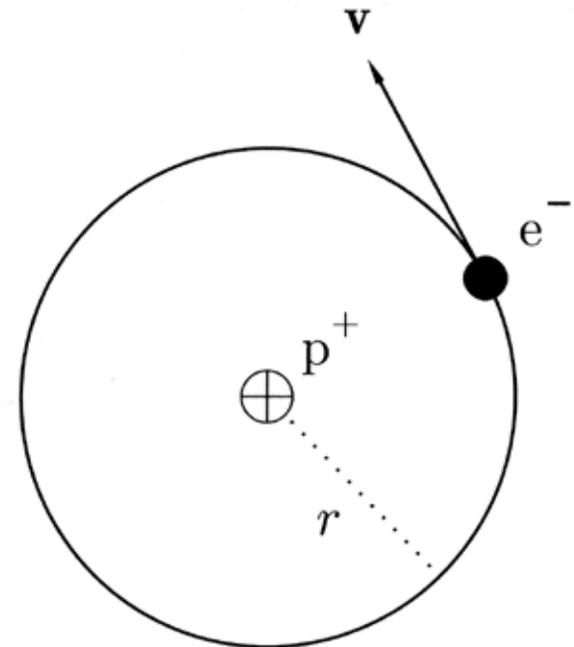
§ Nach dem Bohr-Sommerfeldschen Atommodell wird das Bahnmoment aus dem magnetischen Moment eines Kreisstromes berechnet. Für $l=0$ erhält man so das Bohrsche Magneton μ_B zu

$$m_e v r = h \quad \textcircled{R} \quad v = \frac{h}{m_e r}$$

$$i = -\frac{e}{t} = -\frac{e v}{2\pi r} \quad \textcircled{R} \quad i = -\frac{e v}{2\pi r^2 m_e}$$

$$\mu = \pi r^2 i = -\frac{eh}{2m_e} = -\mu_B$$

$$\mu_B = \frac{eh}{2m_e} = 9,274 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$$



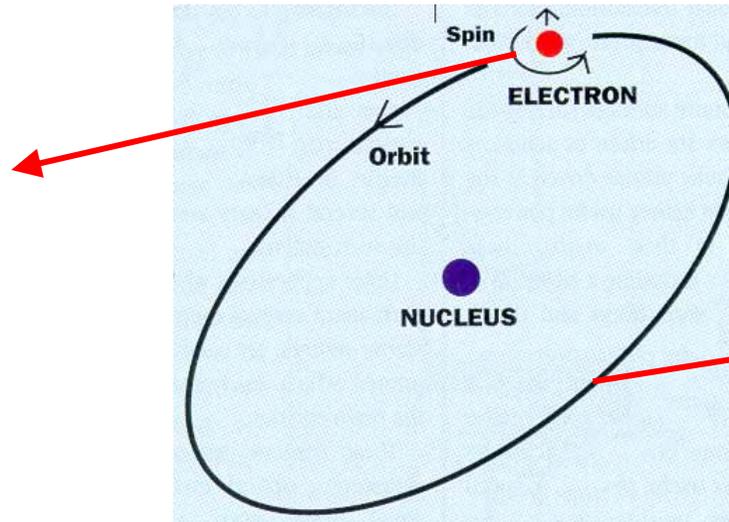
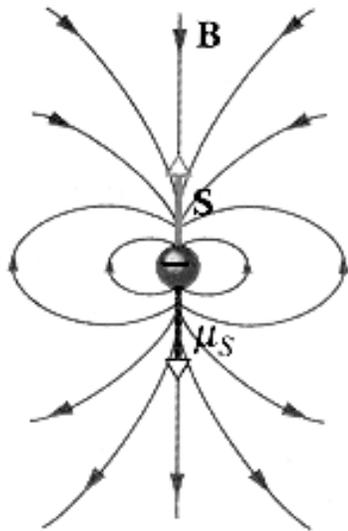
Quantenzahlen

Bezeichnung	Interpretation	Formelzeichen	Wertevorrat
Hauptquantenzahl	Elektronenschale "Energie"wert	n	$n = 1, 2, 3 \dots$
Nebenquantenzahl	Bahndrehimpuls	l	$l = 0, 1 \dots, n - 1$ mit den Bezeichnungen für l : 0 1 2 3 s p d f
Richtungsquantenzahl	Quantenzahl einer Komponente des Bahndrehimpuls	l_z	$l_z = -l, -(l-1) + 1 + \dots 0 \dots (l-1) + 1, l$
Spinquantenzahl	Orientierungsquantenzahl, Quantenzahl des Eigendrehimpuls	s_z	$s_z = -1/2, + 1/2$

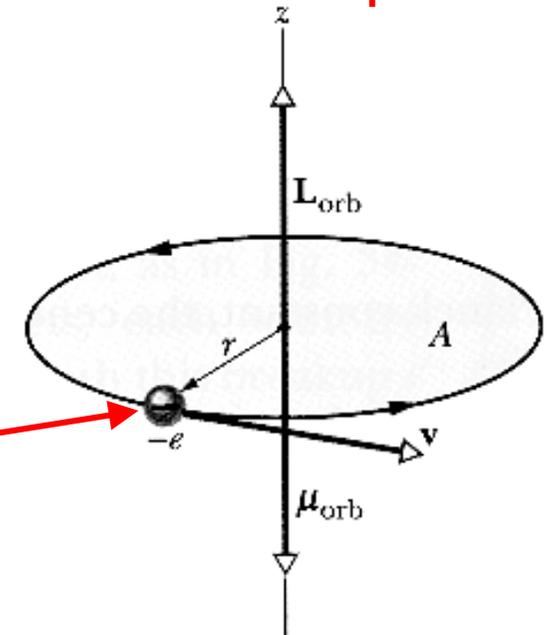
Magnetische Eigenschaften von Festkörpern

- § bestimmt durch das resultierende Moment aller Elektronen, die durch die in der Substanz befindlichen Atome gegeben sind.
- § das Moment eines e^- setzt sich aus Eigen- und Bahndrehimpuls zusammen.
- § das magnetische Moment des Atomkernes und seiner Wechselwirkung mit der Elektronenhülle.

Eigendrehimpuls



Bahndrehimpuls



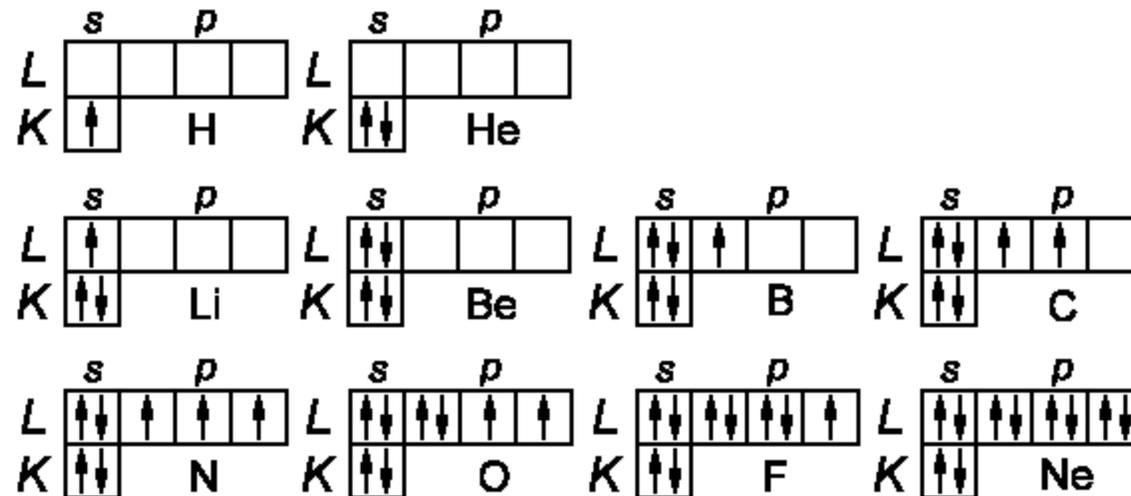
$$\mu_s = \frac{\mu_0 e h}{m_e} \sqrt{s(s+1)} = 2\mu_B \sqrt{s(s+1)}$$

$$\mu_l = \frac{\mu_0 e h}{2m_e} \sqrt{l(l+1)} = \mu_B \sqrt{l(l+1)}$$

Hundsche Regel (1925)



§ Stehen für die energiereichsten Elektronen eines Atoms mehrere Orbitale gleicher Energie zur Verfügung, so werden diese zunächst einfach besetzt.



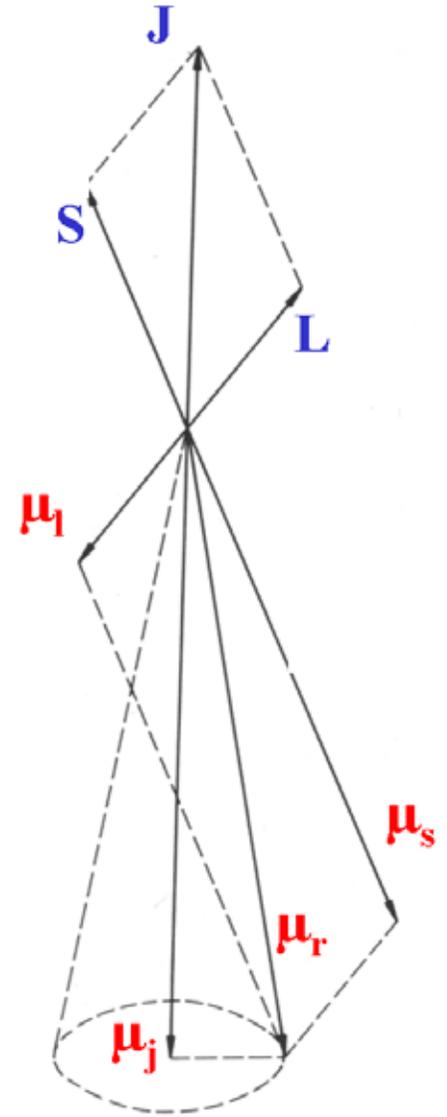
Die s-Niveaus nehmen zwei Elektronen mit entgegengesetztem Spin auf; die p-Niveaus bestehen aus drei Einzelniveaus ($l_z = -1, 0, +1$) mit jeweils max. zwei Spinzuständen, die normalerweise energiegleich (entartet) sind.

Atomares magnetisches Moment

- § nur Elektronen der nicht abgeschlossenen inneren Schalen ergeben ein resultierendes Moment.
- § Die Aufteilung der Elektronen auf die Terme der nicht voll besetzten Schalen kann mit Hilfe der Hund'schen Regeln verstanden werden.
- § Betrag des magnetischen Momentes eines Atoms mit dem Gesamtdrehimpuls \mathbf{J} :

$$\mu_j = g\mu_B \sqrt{J(J+1)} = n_B \mu_B$$

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$



g ist der Landé-Faktor und n_B die Zahl der Bohrschen Magnetonen

Magnetische Eigenschaften

§ Maxwell'schen Gleichungen

$$\tilde{\mathbf{N}} \times \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{j}(\mathbf{r}, t)$$

$$\tilde{\mathbf{N}} \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = - \frac{\partial \varphi(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$$

$$\tilde{\mathbf{N}} \times \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 0$$

$$\tilde{\mathbf{N}} \cdot \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{s}(\mathbf{r}, t) + \frac{\partial \varphi(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \cdot \mathbf{E} \quad , \quad \mathbf{s} = \mathbf{g} \cdot \mathbf{E} \quad , \quad \mathbf{B} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{H}$$

SS10/Fi

- § Elektrische und magnetische Felder werden durch die elektrischen Ladungen und durch die magnetischen Momente der Elementarteilchen erzeugt. Magnetische Felder werden aber auch von bewegten elektrischen Ladungsträgern hervorgerufen.
- § Materialkonstanten haben die Bedeutung von makroskopischen Mittelwerten der betreffenden Eigenschaften über die atomistische Struktur der Substanzen und werden teilweise mit Hilfe der Quantentheorie berechnet sowie teilweise aus dem Experiment bestimmt.

§ Makroskopische Magnetisierung

(magnetisches Moment pro Volumen) :

$$\mathbf{M} = \frac{\boldsymbol{\mu}_{\text{total}}}{V} \quad [\text{A/m}]$$

§ Die magnetische Polarisation ist gegeben durch:

$$\mathbf{J} = \mu_0 \mathbf{M} \quad \hat{=} \mathbf{T} = \mathbf{V} \mathbf{s} / \text{m}^2 \hat{=} \mathbf{j}$$

$$\mu_0 = \frac{4 \rho}{10^7} \quad \hat{=} \frac{\mathbf{V} \times \mathbf{s}}{\mathbf{A} \times \text{m}} \hat{=} \mathbf{U}$$

§ Die entsprechende Materialgleichung aus den Maxwell'schen Gleichungen wird zu:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{J} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = \boldsymbol{\mu} \mathbf{H}$$

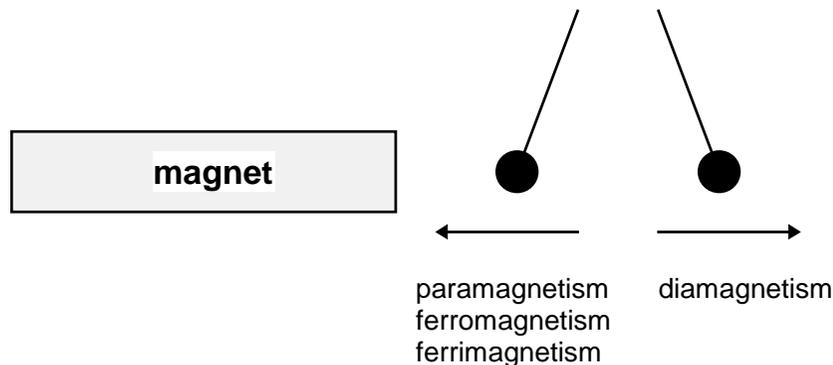
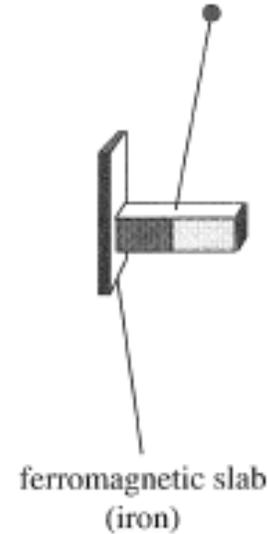
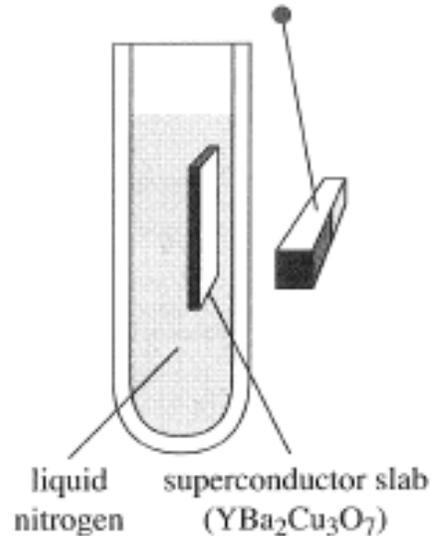
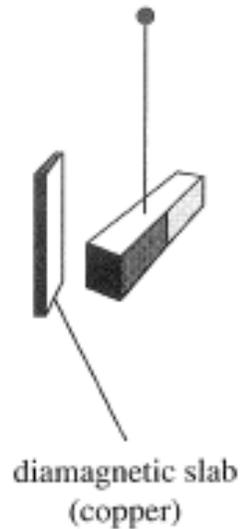
mit μ als **Permeabilität** und μ_r als relative Permeabilität.

§ Zusammenhang zwischen der Magnetisierung \mathbf{M} und dem äußeren Feld \mathbf{H} , wobei c die magnetische **Suszeptibilität** ist.

$$\mathbf{M} = c \mathbf{H}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 (1 + c) \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad , \quad \mu_r = (1 + c)$$

Magnetismus und Materie

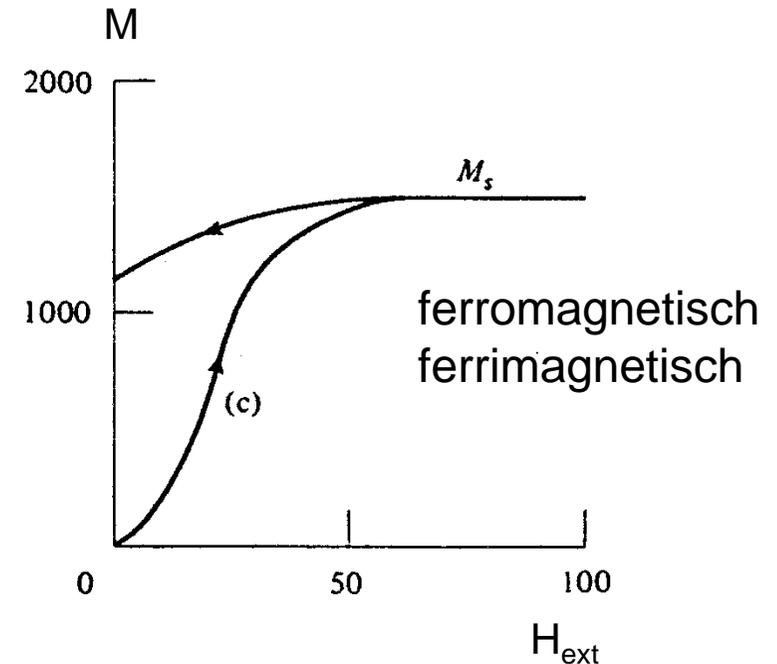
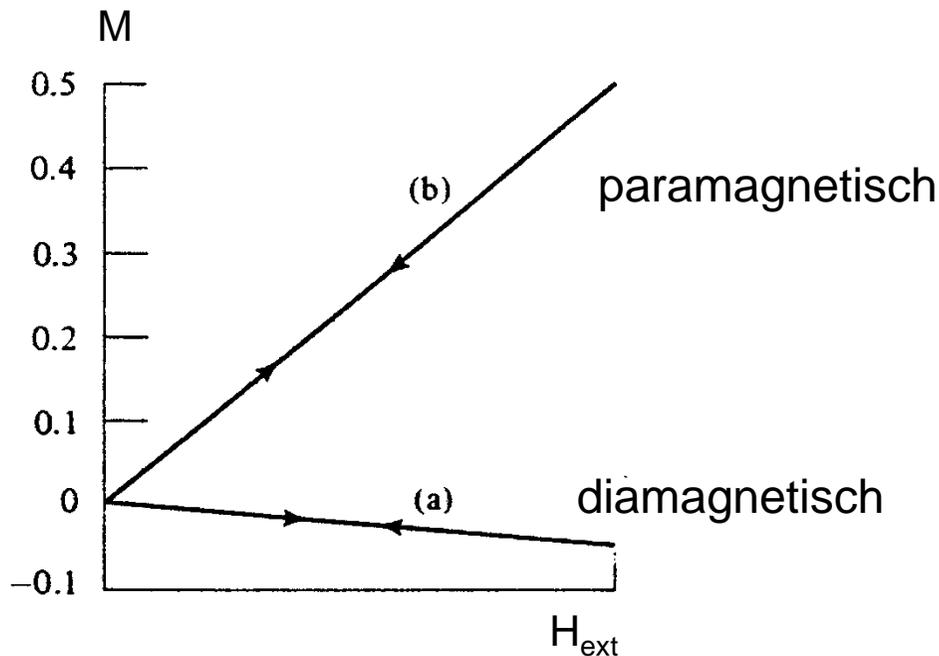


Je nach Wechselwirkung eines magnetischen Körpers mit einem äußeren Magnetfeld unterscheidet man verschiedene Arten des Magnetismus.

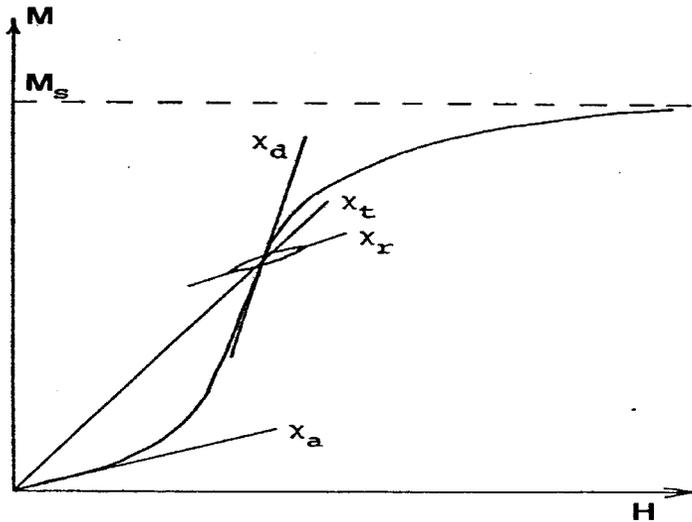
Einteilung der magnetischen Eigenschaften

- § Diamagnetismus $c < 0$
- § Paramagnetismus $c > 0$
- § Ferro- bzw. Ferrimagnetismus $c \gg 0$
- § Antiferromagnetismus $c > 0$

$$\mathbf{M} = c\mathbf{H}$$

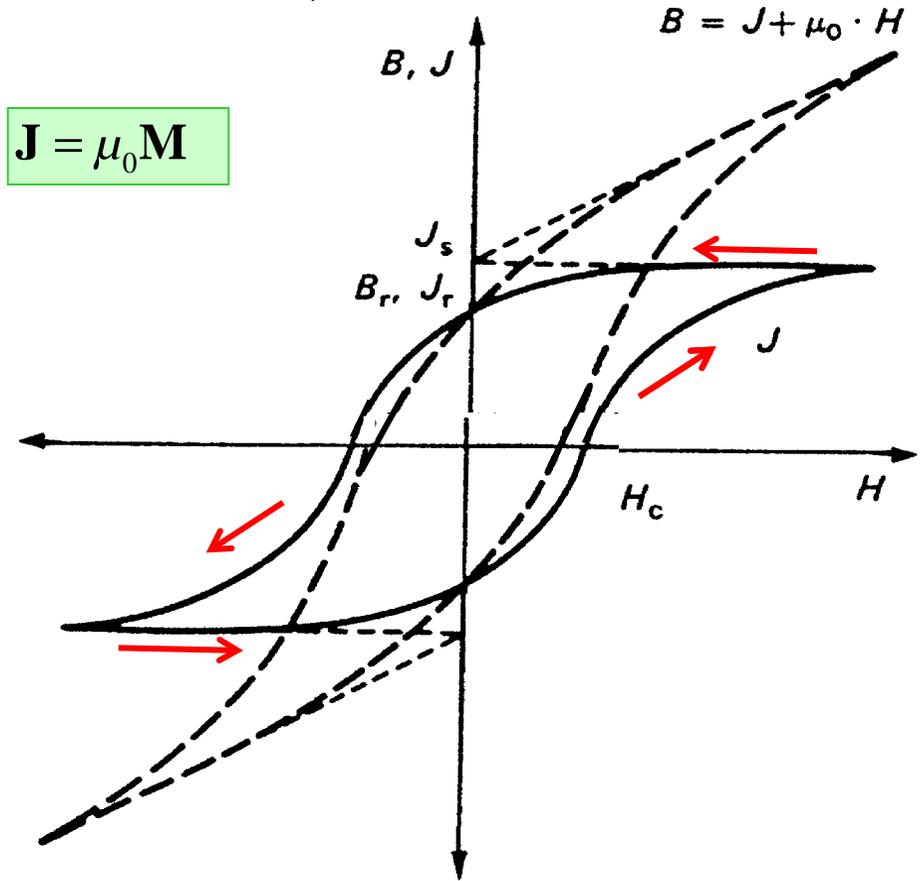


Hysteresese Kurve (Ferro- und Ferrimagnetismus)



$$M = cH$$

$$J = \mu_0 M$$



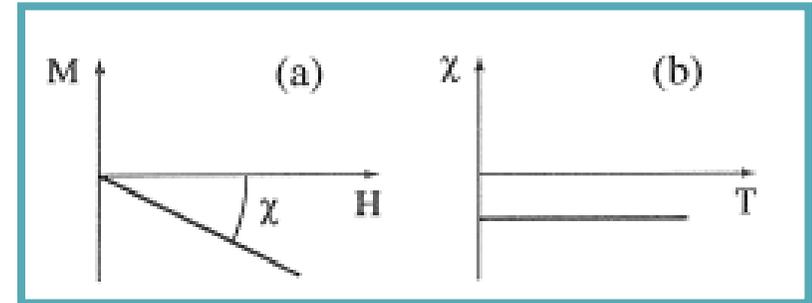
$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 H + J = \mu_0 \mu_r H = \mu H$$

Diamagnetisches Material

- Keine Dipolmomente der Atome
- Keine Wechselwirkung zwischen Atomen
- Keine spontane Magnetisierung
- Keine kritische Temperatur
- $c \gg -10^{-6}$ to -10^{-5} , $c(T) = \text{konstant}$, $\mu \gg 0.99$

Beispiele:

- Edelgas Elemente,
- Metalle (Au, Ag, Cu, Hg, Bi, Be),
- Nichtmetalle (B, Si, P, S, Ge),
- Ionen (Na^+ , Cl^-),
- zwei-atomige Moleküle (H_2 , N_2), H_2O ,
- Organische Verbindungen
- Superleitende Materialien**

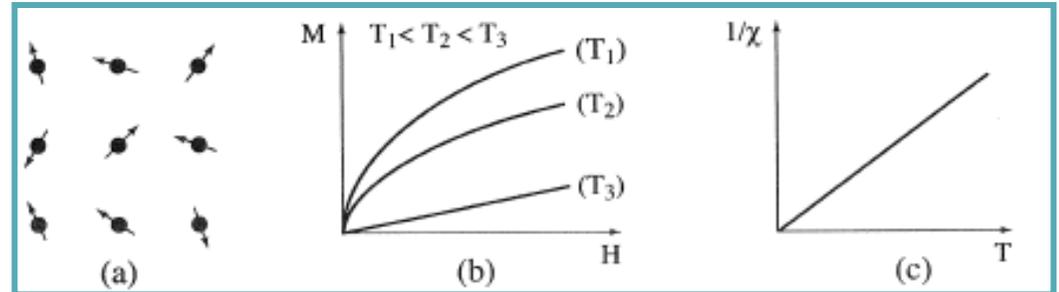


Schweben eines Frosches
in einem 16 T Magnetfeld



Schweben einer Kohlenstoff-Folie

Paramagnetisches Material



Dipolmomente der Atome

Keine Wechselwirkung zwischen Atomen

Keine spontane Magnetisierung

Keine kritische Temperatur

$c \gg 10^{-5}$ to 10^{-3}

$\mu \gg 1.00$

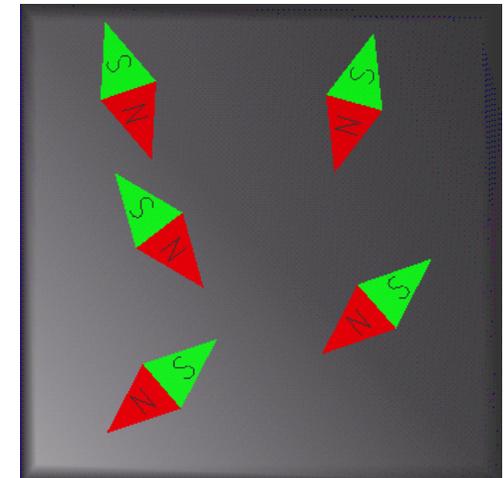
$$C = \frac{M}{H} = \frac{C}{T}$$

Curie Gesetz

Beispiele:

Metalle (W, Al, Pt, Mn, Cr),
zwei-atomige Gase (O_2),
Ionen der Übergangsmetalle,
Seltene Erd Oxide

Superparamagnetische Materialien

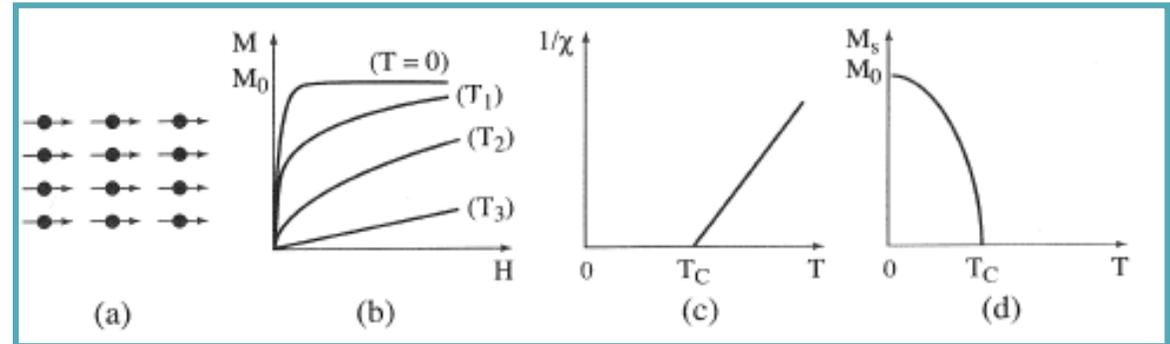
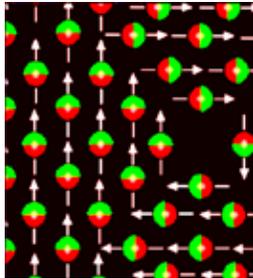


Ferromagnetisches Material

$$C = \frac{M}{H} = \frac{C}{T - T_c}$$

($T > T_c$)

Curie-Weiss Gesetz



Dipolmomente der Atome

Wechselwirkung zwischen Atomen führt zu paralleler Ausrichtung

Spontane Magnetisierung unterhalb der **Curie Temperatur**

(Übergang vom Paramagnetismus)

$c \gg \text{up to } 10^5$ $\mu \gg \text{up to } 10^5$

Beispiele:

Metalle (Fe, Co, Ni),

Seltene Erd Elemente

Verbindungen mit Fe, Co, Ni,

Verbindungen mit Seltenen Erd Metallen

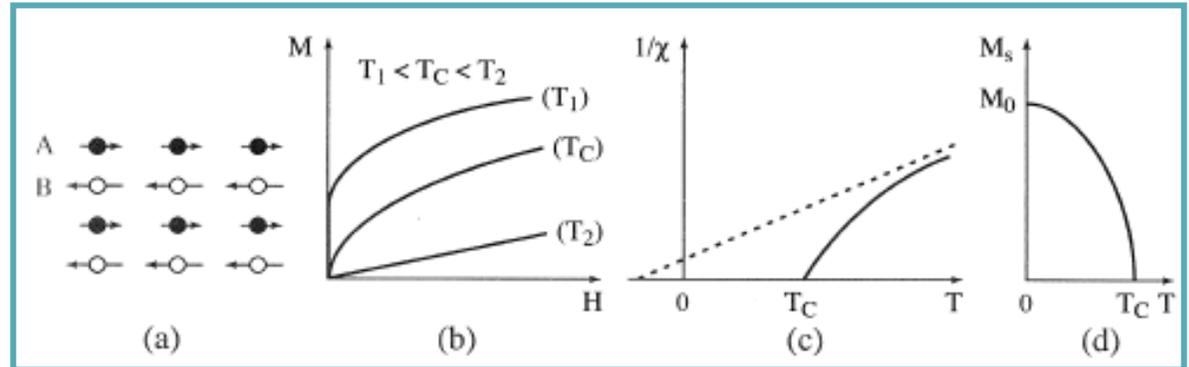
wie z.Bsp. SmCo_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$

Heusler Legierungen

wie z. Bsp. MnAl, MnBi, Mn(Cu₂Al)

	c	T_c [K]	J_s [T] (at 295 K)
Fe	13600	1043	2.15
Co	11000	1393	1.80
Ni	4690	631	0.60
Gd		289	
Tb		218	
Dy		90	
Ho		20	
Er		20	
Tm		22	

Ferrimagnetisches Material



Dipolmomente der Atome

Wechselwirkung zwischen Atomen führt zu antiparalleler Ausrichtung

Spontane Magnetisierung unterhalb der **Curie Temperatur**

(Übergang vom Paramagnetismus)

$c \gg \text{up to } 10^5$ $\eta \gg \text{up to } 10^5$

Beispiele:

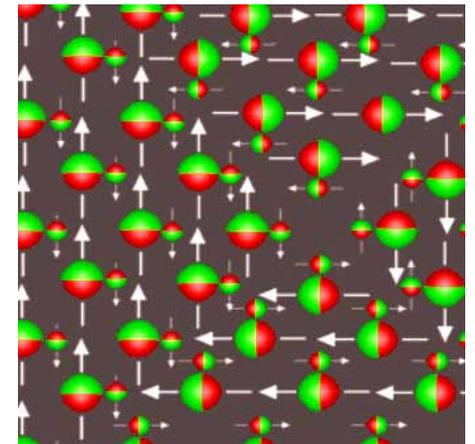
Spinell Ferrite

Hexaferrite

Orthoferrite

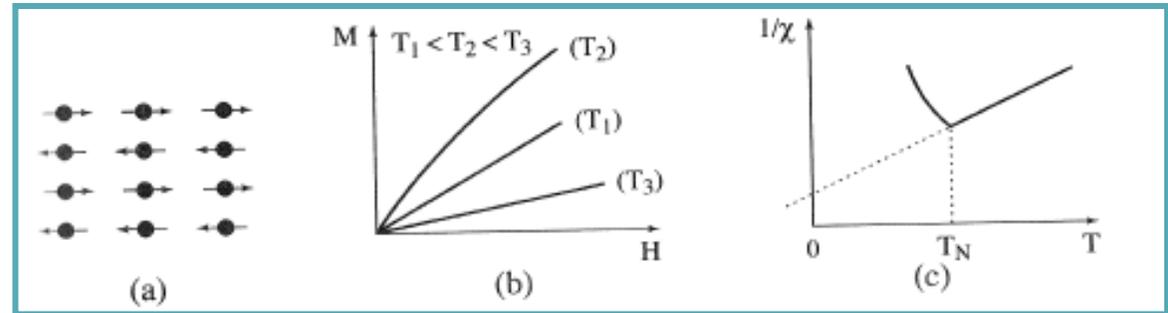
Granaten

$$C = \frac{M}{H} = \frac{C}{T - T_C} \quad (T > T_C)$$



Antiferromagnetisches Material

$$C = \frac{M}{H} = \frac{C}{T + T_N} \quad (T > T_N) \quad \text{SS10/Fi}$$



Dipolmomente der Atome

Wechselwirkung zwischen Atomen führt zu antiparalleler Ausrichtung

Keine spontane Magnetisierung unterhalb der **Neel Temperatur**

(Übergang vom Paramagnetismus)

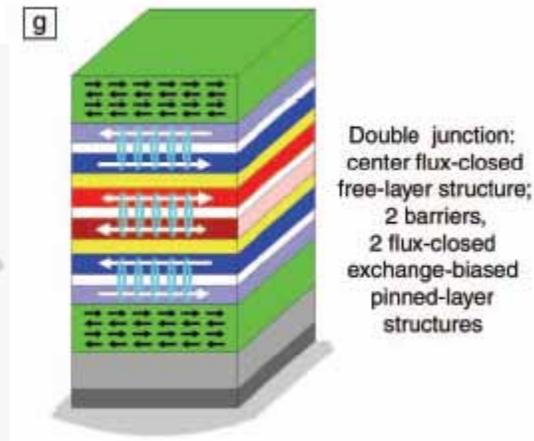
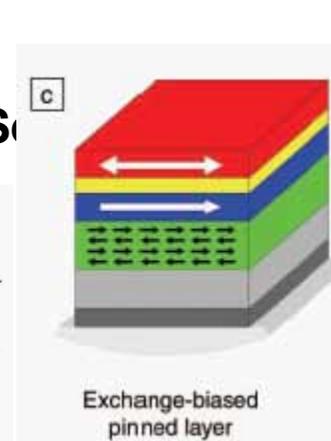
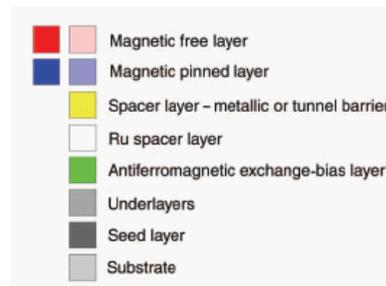
$c \gg \text{up to } 10^{-5} \text{ to } 10^{-3} \quad T_N \approx T_c$

Beispiele:

Verbindungen der Übergangsmetalle

wie z.Bsp. MnO, CoO, NiO, Cr₂O₃, MnS, MnSe

„Magnetic Spin Valves“ und „Tunnel Junctions“



Klassische Theorie des Ferromagnetismus

§ Nach dem Weiß'schen Ansatz ist die Magnetisierung einem **Molekularfeld** proportional, das mit Werten um 10^9 A/m alle technisch erzeugbaren Felder um mehrere Größenordnungen übertrifft.

§ **Austauschwechselwirkung nach Heisenberg**

$I_A > 0$ eine parallele Spinkopplung und

$I_A < 0$ eine antiparallele Spinkopplung.

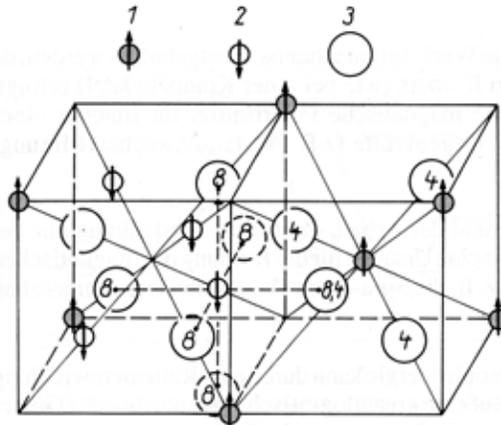
$$f_{ij} = -2I_A \times \mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_j$$



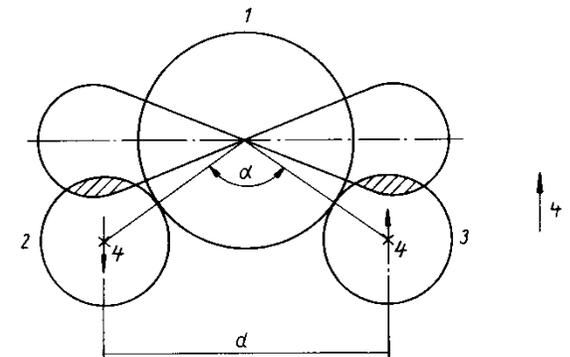
$$A_{bcc} = \frac{I_A S^2}{a}$$

$$F_A' = A \times \frac{\sum_{k,l} \frac{\partial^2}{\partial x_l^2} \psi}{\psi}$$

Beispiel:
Superaustausch
Spinellferrit



- (1) O²⁻
- (2) Fe³⁺
- (3) Mn²⁺



Kristallanisotropieenergie F_c

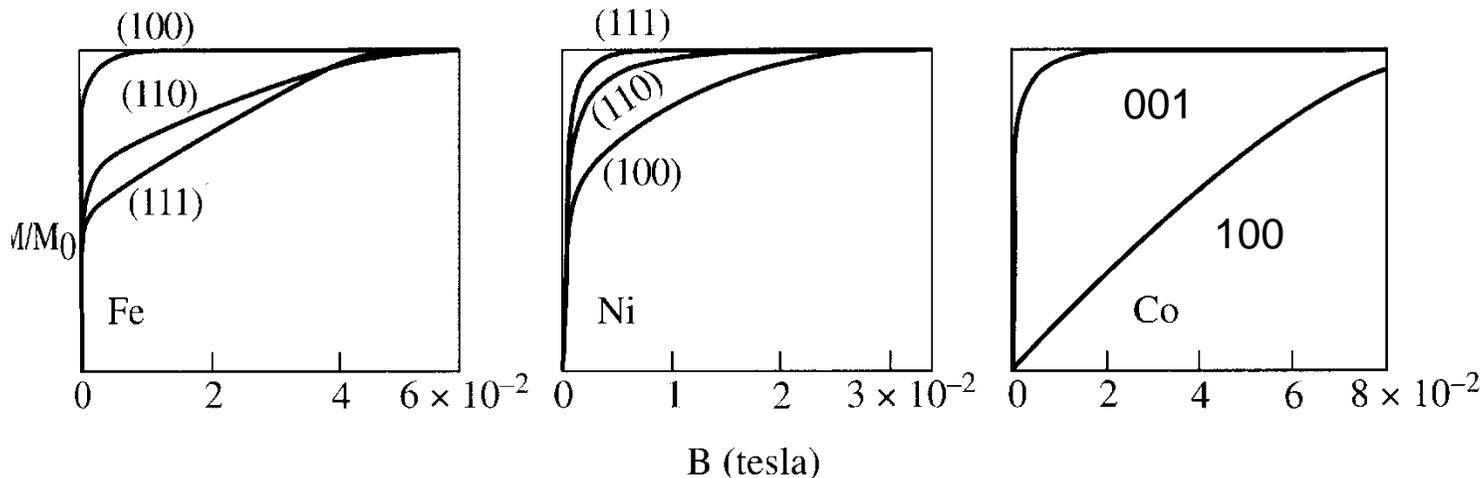
- § Der Vektor der magnetischen Polarisation ist in einem Festkörper an **bestimmte Richtungen (leichte Achsen)** gebunden. Diese sind durch die Kristallstruktur oder andere Anisotropien, wie z.Bsp. Spannungsanisotropie, induzierte Anisotropie, Formanisotropie, etc. vorgegeben.
- § Man unterscheidet zwischen einachsiger und kubischer Anisotropie:

$$F_c = \sum_n K_n \sin^{2n} \theta \quad @K_0 + K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta + \dots$$

einachsig

$$F_c = K_0 + K_1 (a_1^2 a_2^2 + a_2^2 a_3^2 + a_1^2 a_3^2) + K_2 (a_1^2 a_2^2 a_3^2)$$

kubisch

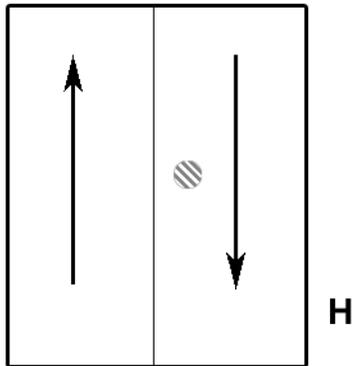


Barkhausen Effekt (1919)

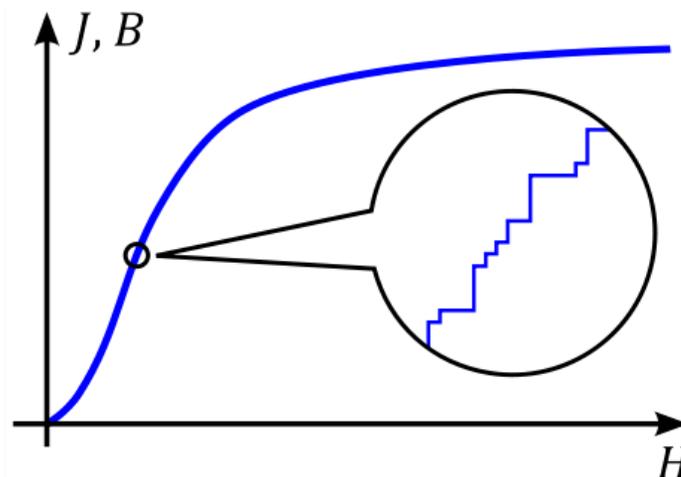
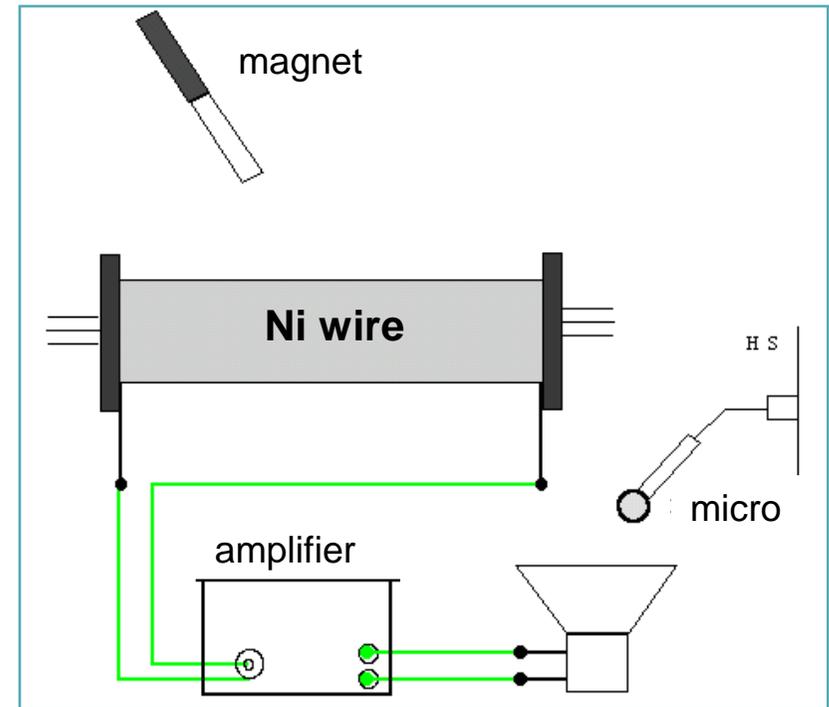
$$\tilde{\mathbf{N}}' \mathbf{E} = - \frac{\nabla \mathbf{B}}{\nabla t}$$

$$\oint \mathbf{E} \times d\mathbf{l} = - \frac{d}{dt} \oint \mathbf{B} \times d\mathbf{A}$$

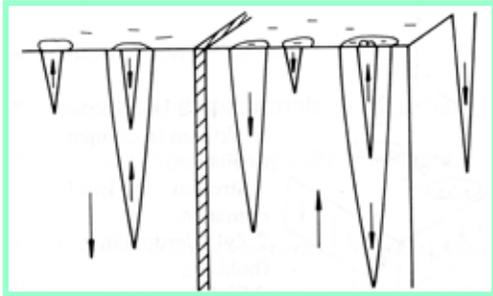
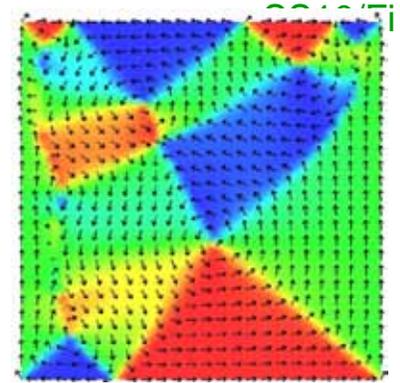
$$u_{ind} = - N \frac{df}{dt}$$



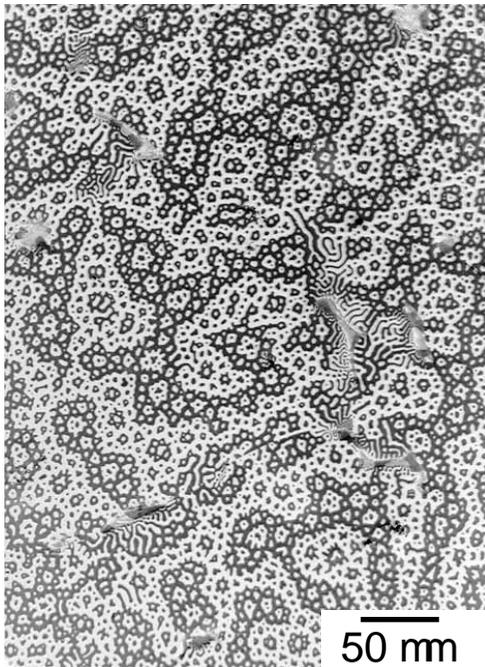
Barkausen jump due to moving domain wall



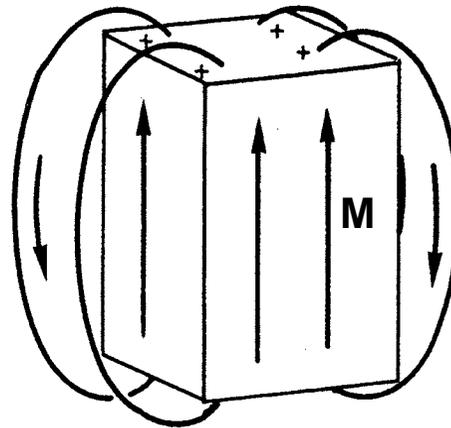
Magnetische Domänenstruktur



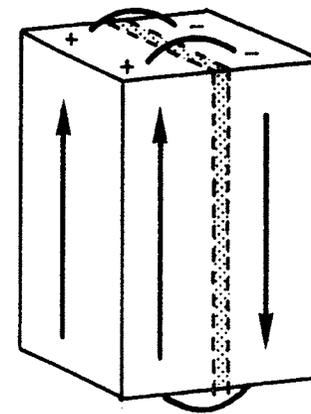
Landau und Lifschitz (1935)
Mikromagnetismus (W.F. Brown)



SmCo₅ Kristall
($\mathbf{M} \perp$ Oberfläche)



starke Streufelder



verminderte Streufelder bei
einachsigen und kubischen
Kristallen

Magnetische Domänen und Hysterese Kurve

§ Beitrag zur freien Energie des Systems

(Thermodynamik)

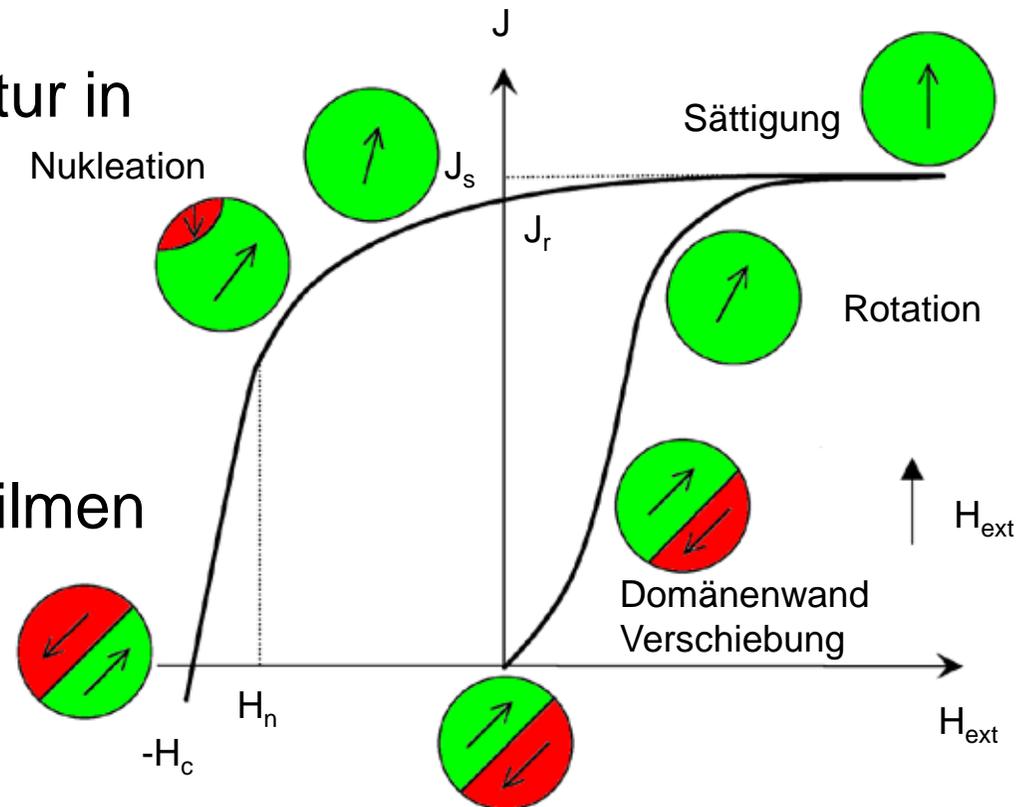
§ Magnetische Domänen Struktur in

○ „einachsigen“ Materialien

○ „kubischen Materialien“

○ „dünnen magnetischen Filmen“

§ Domänen Wände



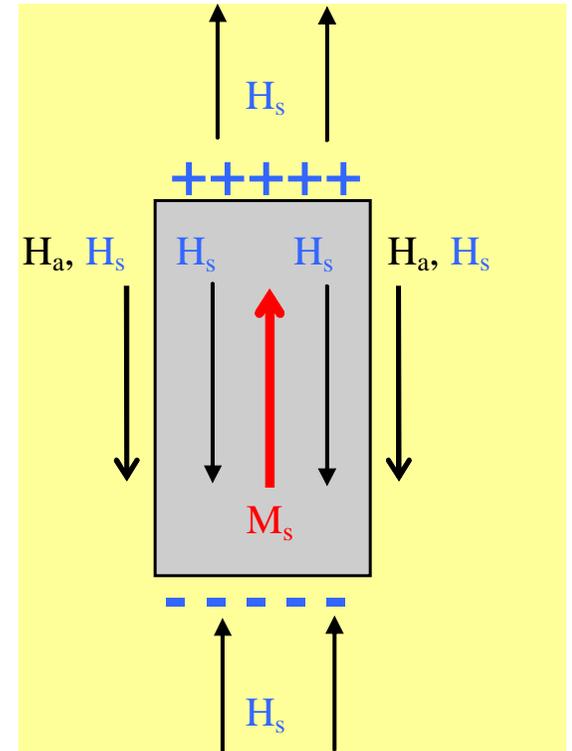
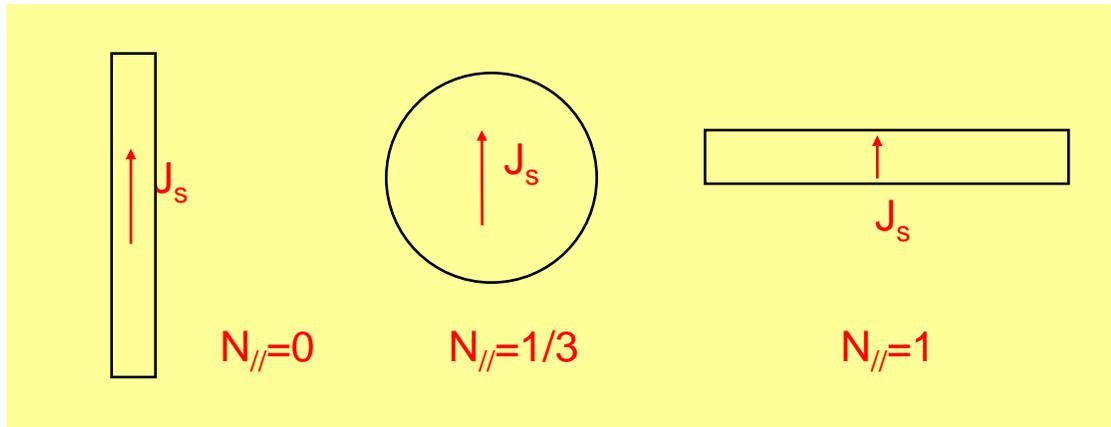
Magnetisches Streufeld - Formanisotropie

§ Das entmagnetisierende Feld \mathbf{H}_s oder das magnetische Streufeld ist proportional zu \mathbf{M}_s und dem von der Probengeometrie abhängigen Entmagnetisierungsfaktor N:

$$\mathbf{H}_s = - N \times \mathbf{M}_s$$

§ Streufeldenergiedichte

$$F_{s'} = - \frac{1}{2} \times \mathbf{H}_s \times \mathbf{J}_s = - \frac{1}{2} \times \mu_0 \times \mathbf{H}_s \times \mathbf{M}_s = \frac{1}{2} \times \mu_0 \times N \times \mathbf{M}_s^2$$

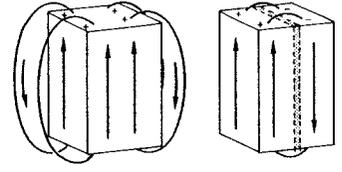
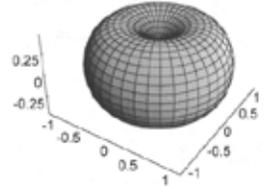


Mikromagnetismus

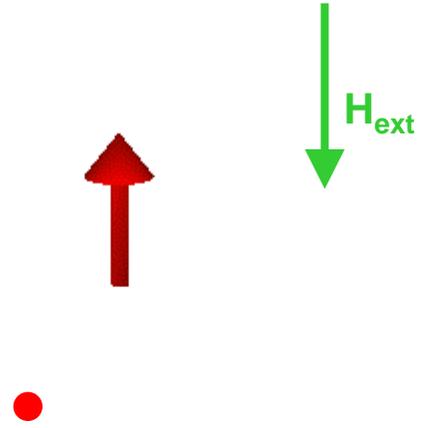
Drehmoment
 $\mathbf{t} = \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{H}_{\text{ext}}$

Minimierung der Gesamtenergie

$$F_{\text{tot}} = F_A + F_K + F_H + F_s + F_m$$



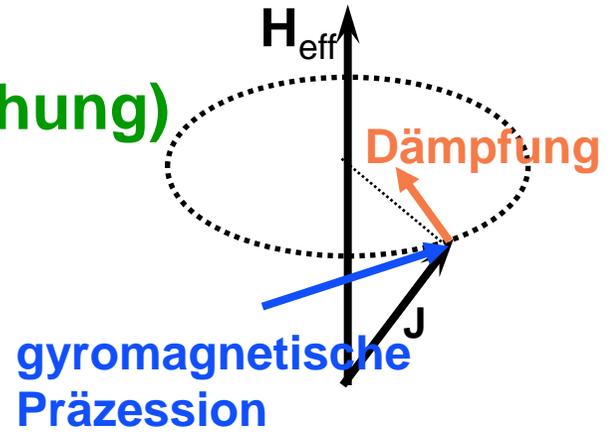
Austausch **Anisotropie** **Äußeres Feld** **Streifeld**
 leichte Richtungen



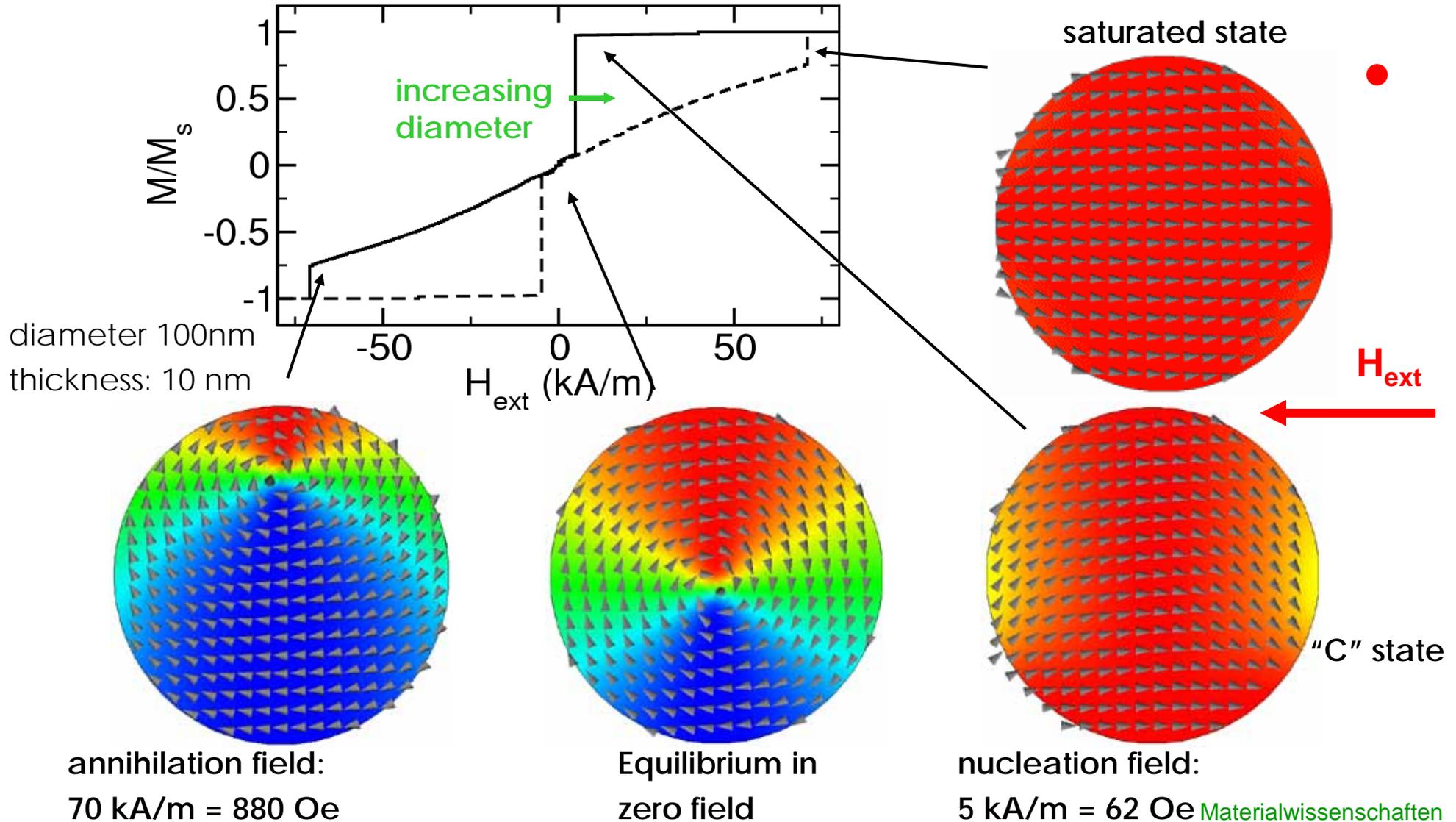
Drehmoment auf Magnetisierung (LL-Gleichung)

$$\frac{\nabla \mathbf{J}}{\nabla t} = - \frac{|g|}{1+a^2} (\mathbf{J}' \times \mathbf{H}_{\text{eff}}) - \frac{a}{J_s \times (1+a^2)} \hat{\mathbf{e}}_J \times (\mathbf{J}' \times \mathbf{H}_{\text{eff}})$$

$$\mathbf{H}_{\text{eff}} = - \frac{dF_{\text{gesamt}}}{d\mathbf{J}} = \mathbf{H}_A + \mathbf{H}_K + \mathbf{H} + \mathbf{H}_S + \mathbf{H}_M$$



Circular nanodot – vortex domain state



Bloch - Domänenwand

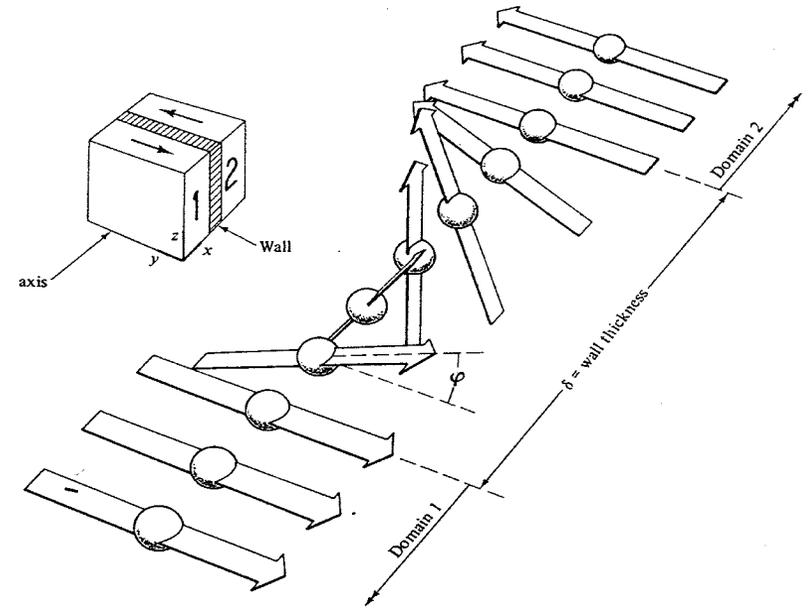
$$F_{ex}' = \frac{A}{\epsilon} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = 0$$

$$F_c' = K_1 \sin^2 j \times dx$$

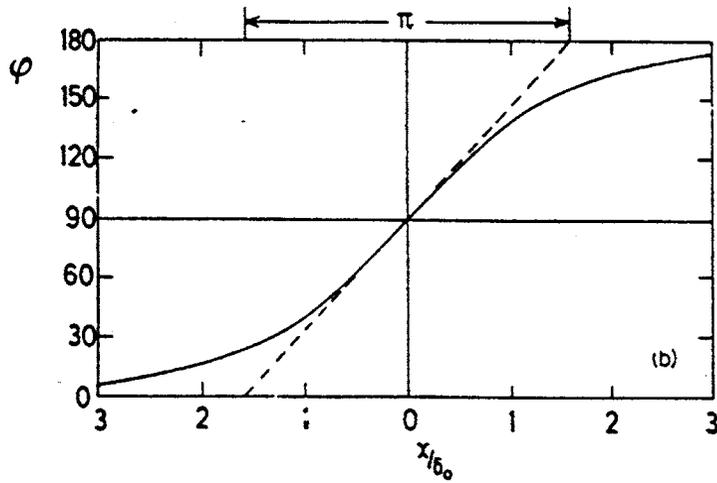
$$\frac{\partial F_t'}{\partial x_0} = 0 \quad \text{p}$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{A}{K_1}}$$

$$\cos j = - \tanh \left(\frac{x}{d_0} \right)$$



Structure of a 180° wall.



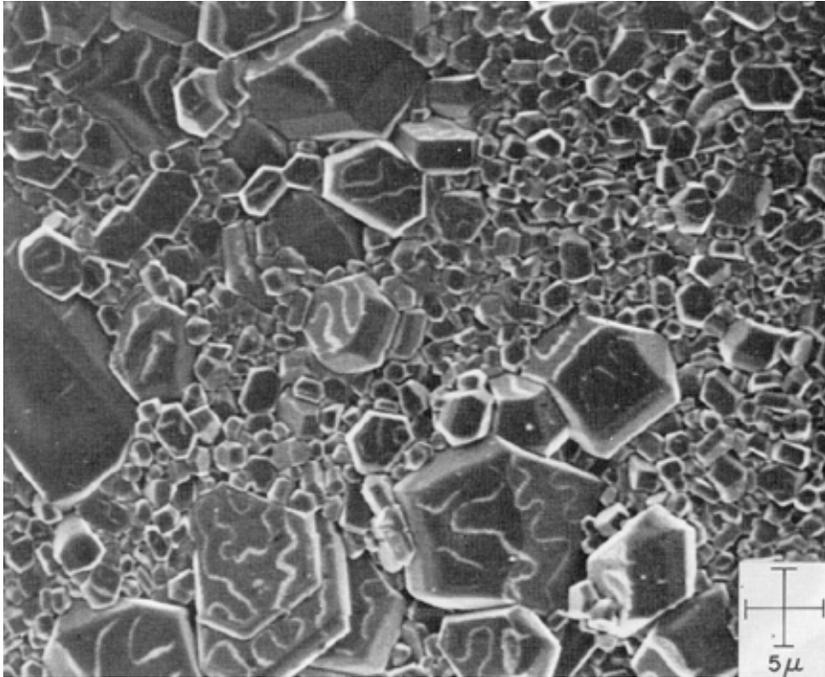
$$d = p \times d_0 = p \times \sqrt{\frac{A}{K_1}}$$

Berücksichtigung von K_2 :

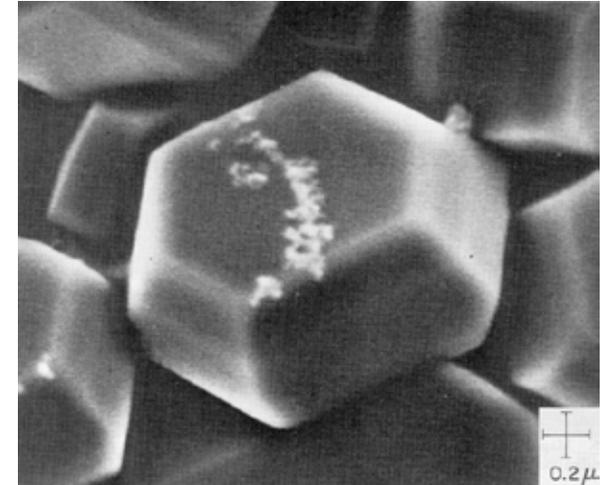
$$d = p \times \sqrt{\frac{A}{K_1}} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{K_2}{K_1}}}$$

for $K_1 > -2K_2$

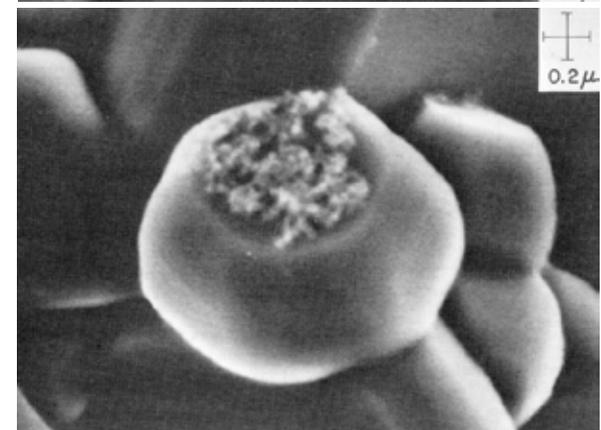
Eindomänenteilchen in Ba-Ferrit



$D = 1,7\ \mu\text{m}$



$D = 1,3\ \mu\text{m}$



K. Goto, M. Ito and T Sakurai,
Jap.J.Applied Physics 19 (1980) 1339-46.

Eindomänen Teilchen

Kritische Größe

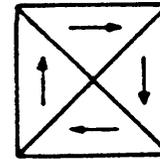
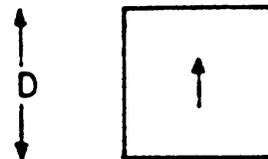
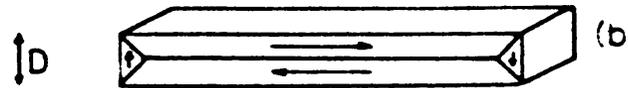
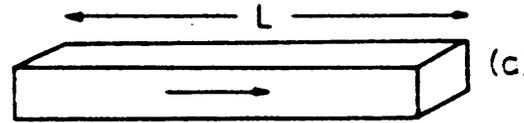
Beispiel: Würfel

$$F_g = 2 \times \sqrt{2} \times g \times D^2$$

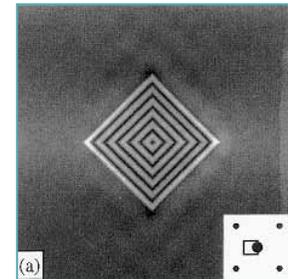
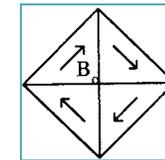
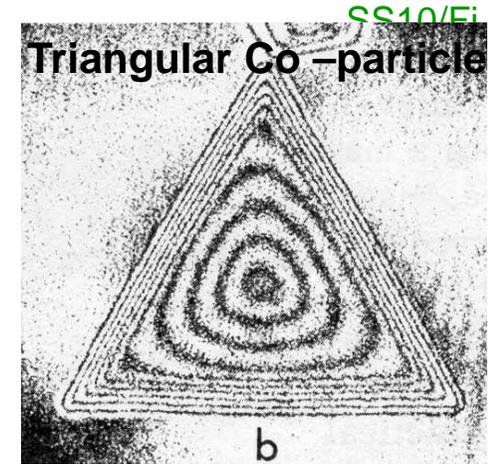
$$F_s \gg m_0 \times \frac{1}{6} \times M_s^2 \times D^3$$

$$\frac{1}{D} (F_g - F_s) = 0$$

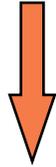
$$D_0 = \frac{8 \times \sqrt{2} \times g}{M_s^2 \times m_0}$$



Needle and cube as single-domain particles (a, c) and subdivided into domains (b, d).



Weich oder hart magnetisch?

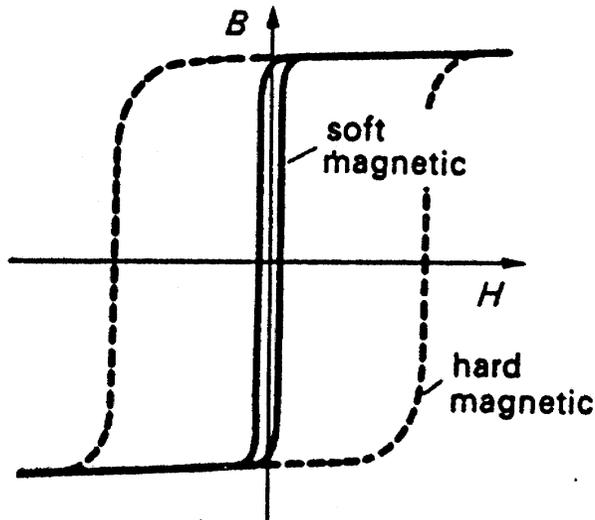


Koerzitivfeld H_c

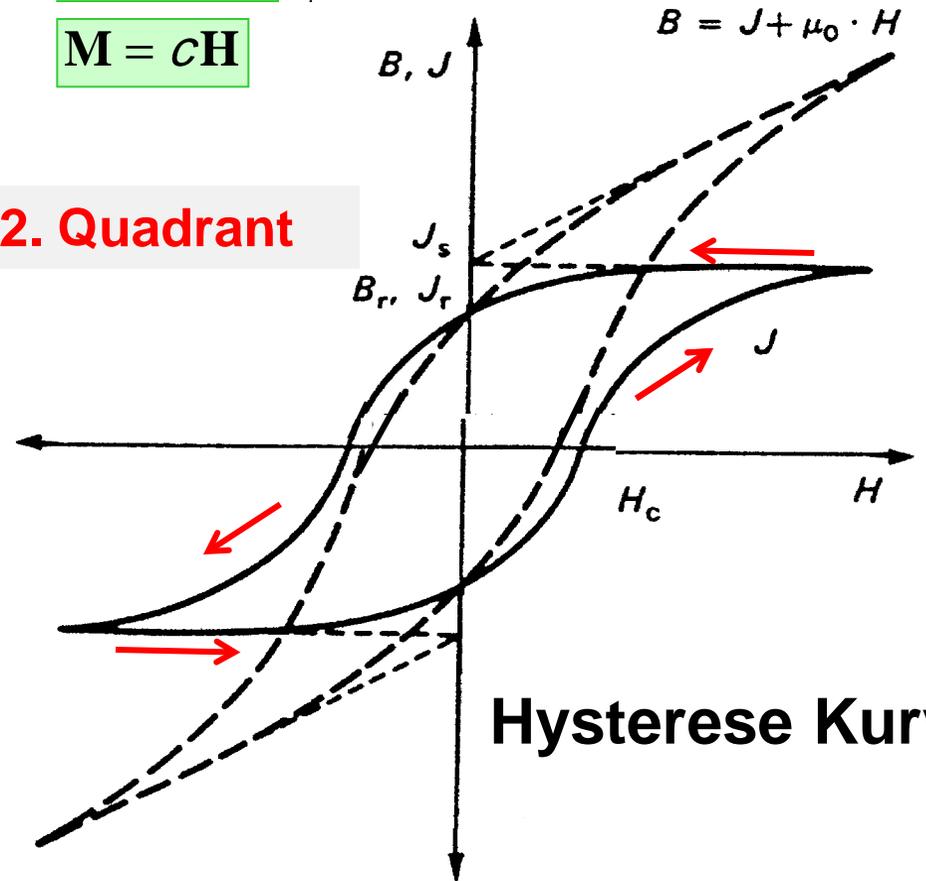
$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{J} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = \mu \mathbf{H}$$

$$\mathbf{J} = \mu_0 \mathbf{M}$$

$$\mathbf{M} = c \mathbf{H}$$



2. Quadrant

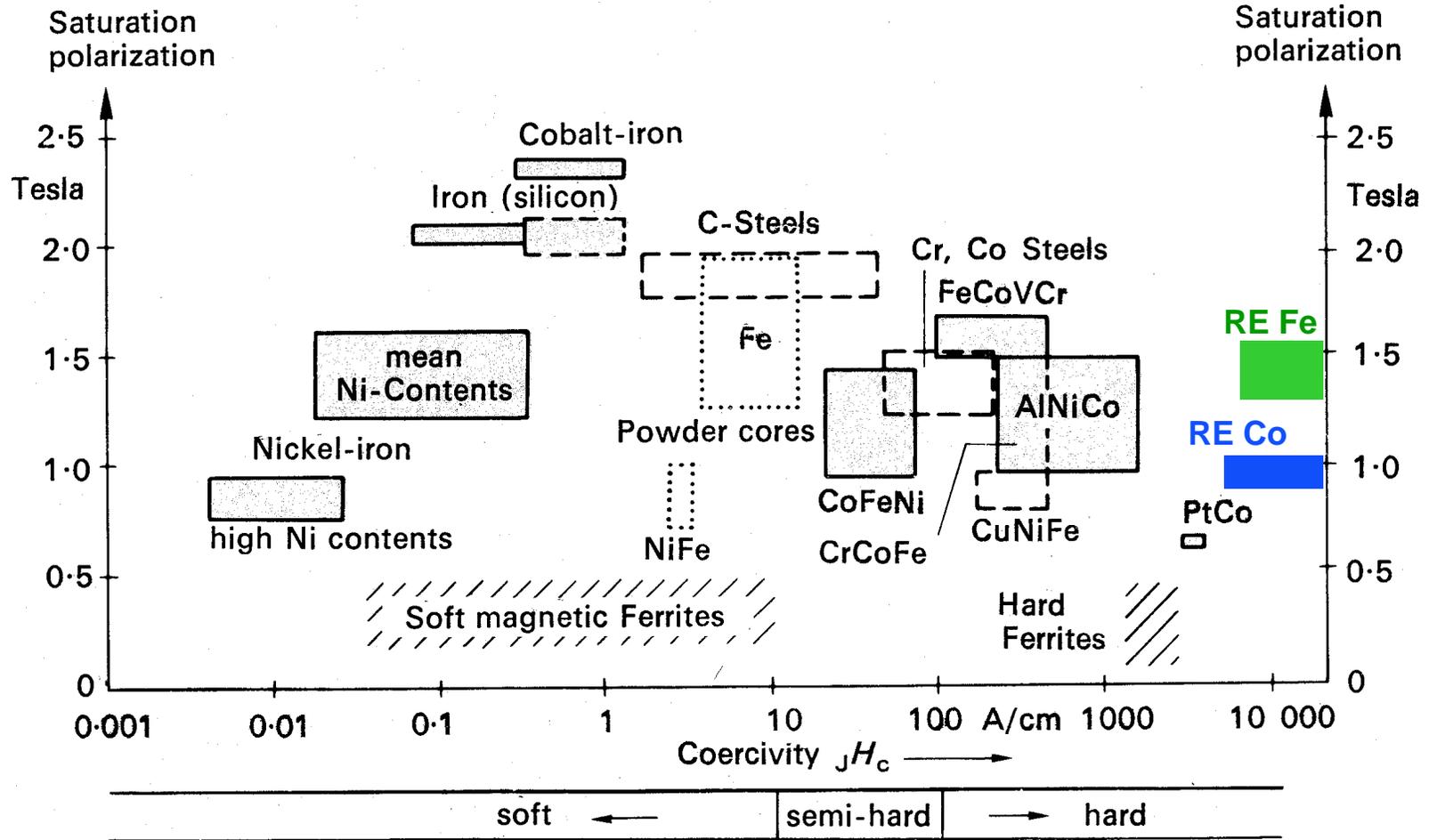


Hysteresis Kurve

Intrinsische Eigenschaften

	n_B (0K)	J_S (0K) [T]	J_S (300K) [T]	T_C [K]	K_1 (300K) [k J/m ³]	A (300K) [p J/m ³]
Fe	2,2	2,19	2,14	1043	48	8,8-33
Ni	0,608	0,656	0,61	631	5	3,4
Co	1,74	1,78	1,75	1400	430	10,3
FeCo 50/50	2,43		2,45		-35	
SmCo₅			1,10	990	17000	12-22
Nd₂F₁₄B			1,61	585	4900	10
(BaO.6Fe₂O₃)	20	0,72	0,47	730	300	
(NiO.Fe₂O₃)	2,3	0,34	0,31	840	-7	
(MnO.Fe₂O₃)	5	0,69	0,48	615	-4	

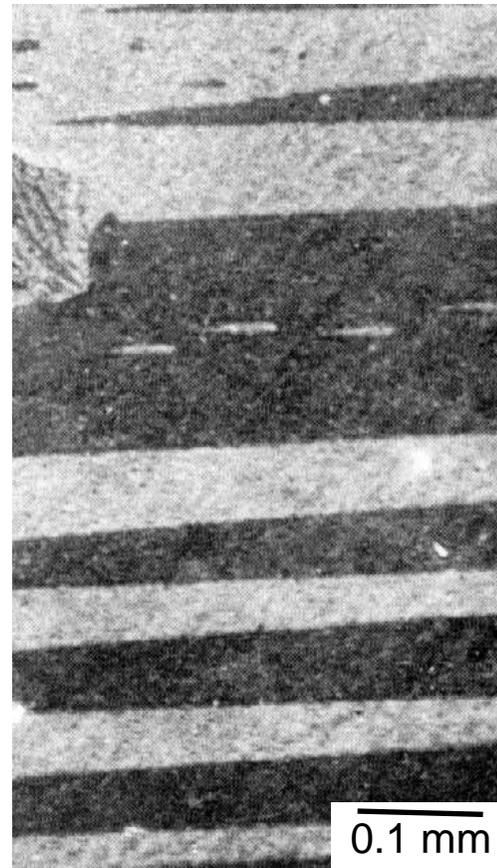
Übersicht - magnetischen Werkstoffe



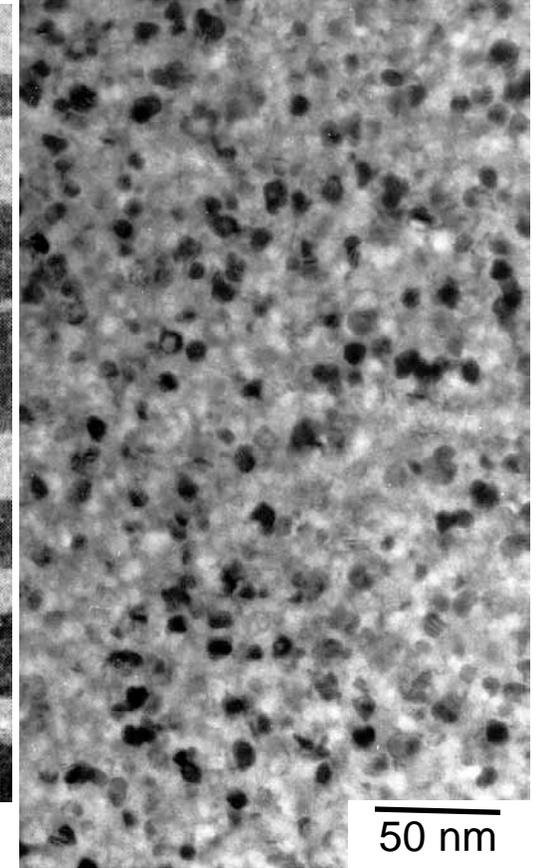
R. Boll, „Soft Magnetic Materials“, Siemens AG, Hyden & Son, 1977

Weichmagnete

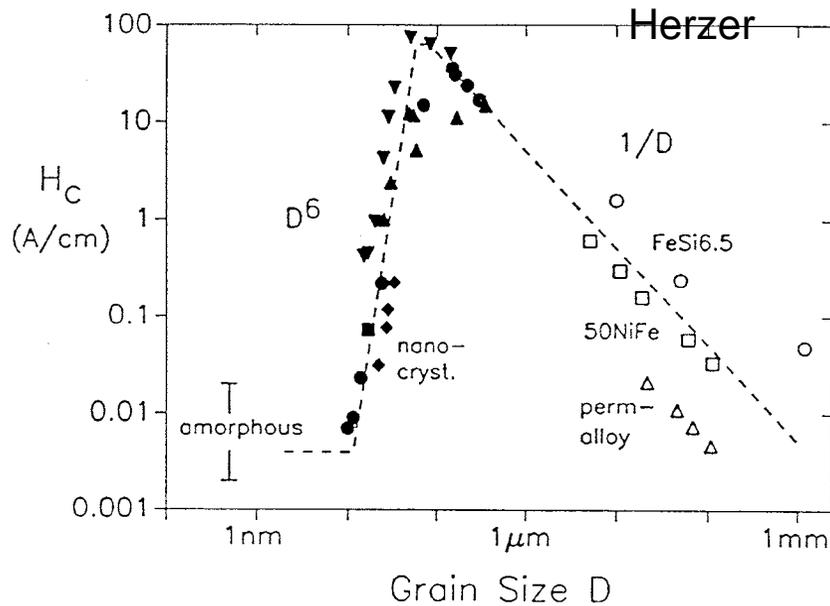
Magnet	J_r (T)	H_{cJ} (A/m)
Fe	2.15	10-100
Fe-Si	2.0	8
Fe-Ni	0.75	0.5
Fe-Cu-Nb-Si-B (nanokristallin)	1.23	0.4
Co-Fe-Mo-Si-B (amorph)	0.55	0.3



Domänen innerhalb eines Fe-Si Korns



$Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ nanokristallin



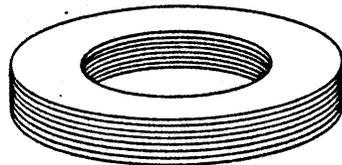
Weichmagnete - Anwendungen

- § Transformatoren
- § Generatoren, Motoren
- § Relais, Wandler und Übertrager,
Fehlerstromschutzschalter,
Leistungselektronik
- § Magnetköpfe
- § Hochfrequenzanwendungen
(MHz – GHz)

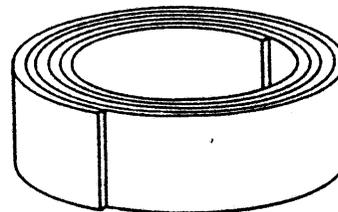
Spinellferrite, Granate



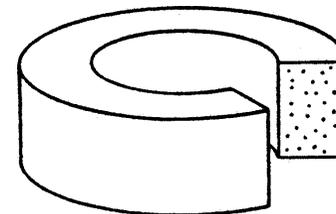
Wichtig !!!
Vermeidung von mechanischen Spannungen



(a) Stacked laminations

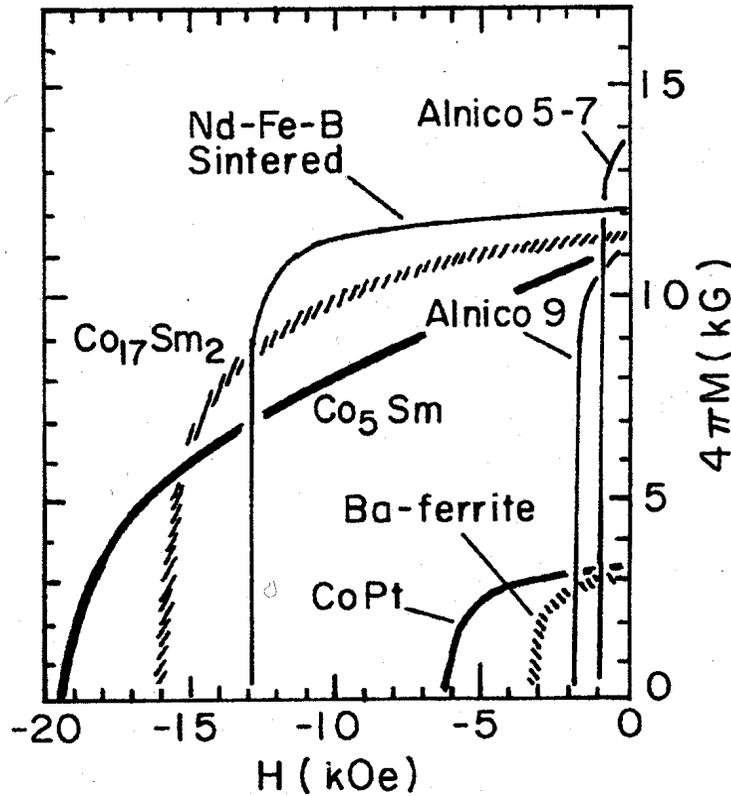


(b) Tape-wound core

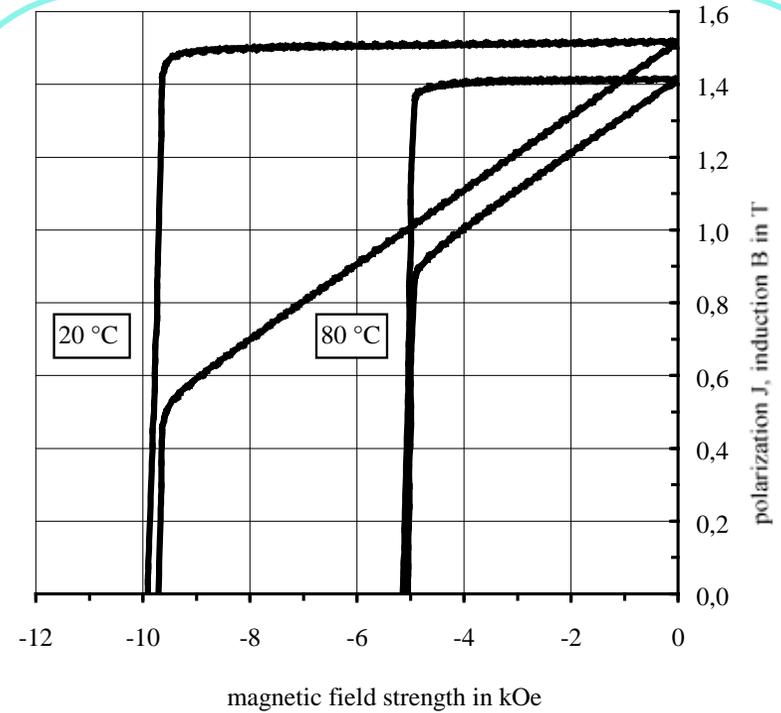


(c) Powder core

Hartmagnete - Entmagnetisierungskurven



R. O Handley, „Modern Magnetic Materials, Principles and Applications, Wiley, 2000.



W. Rodedwald, B. Wall, M. Katter and K.Uestuener, „Top Nd-Fe-B Magnets: >56 MGOe Energy Density, 9.8 kOe Coercivity“, IEEE Trans.Magn. 38 (2002) 2955-2957.

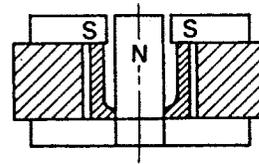
$J_r=1.519 \text{ T}, H_c=780 \text{ kA/m}, (B.H)_{max}= 451 \text{ kJ/m}^3$

Hartmagnete - Anwendung

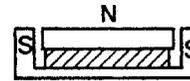
$$H_{ag} \gg \sqrt{\frac{V_m \times (B_m \times H_m)}{m_0 \times V_{ag}}}$$

Lautsprechermagnet:

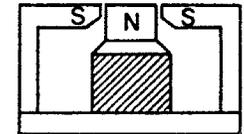
Ferrite



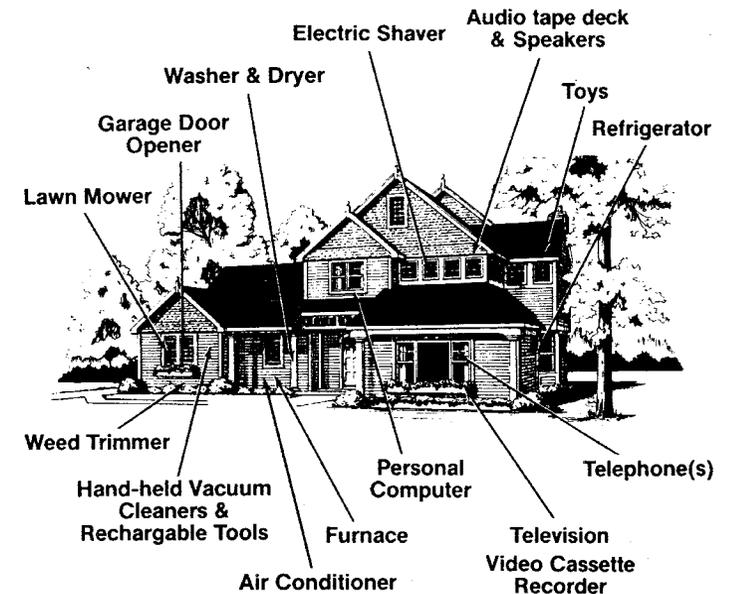
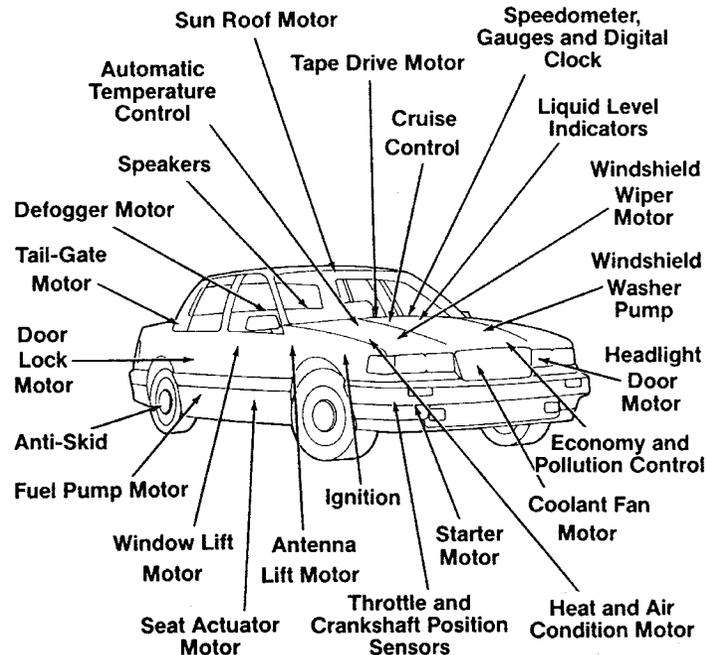
Sm-Co



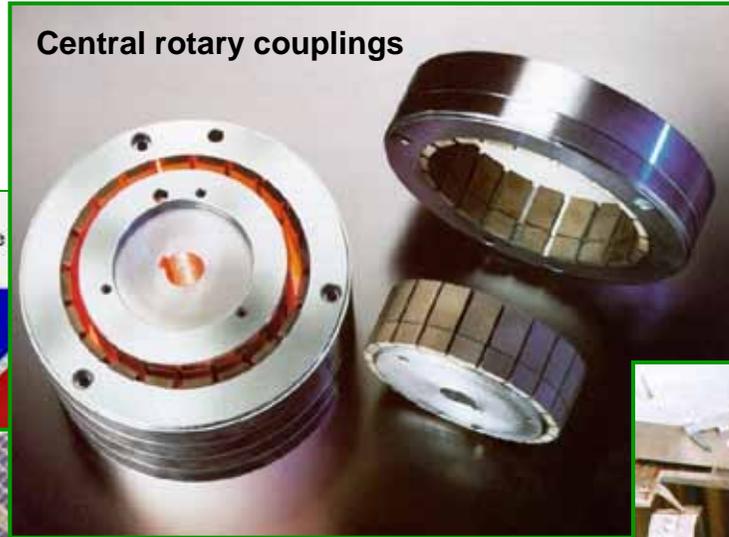
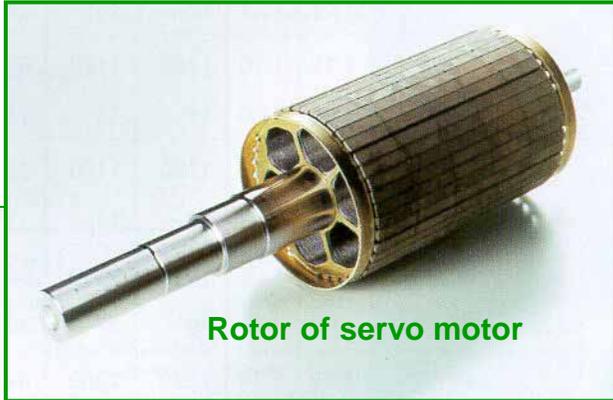
AlNiCo



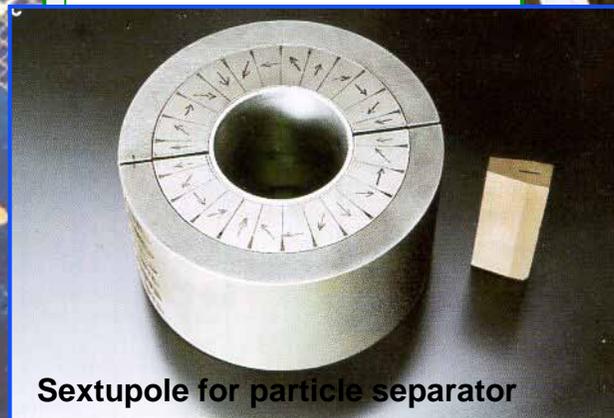
Magnete in Auto und Haus:



Anwendungen SE Magnete



Dipole magnet with a diameter of 1.5 m in the „Alpha Magnetic Spectrometer“ particle detector (about 5000 rectangular magnets).



Anwendungen SE Magnete

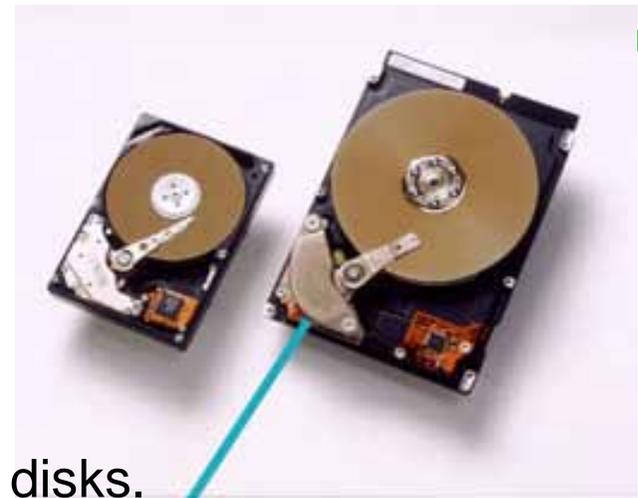
Magnetic Resonance Imaging



The world's smallest hard disk drive

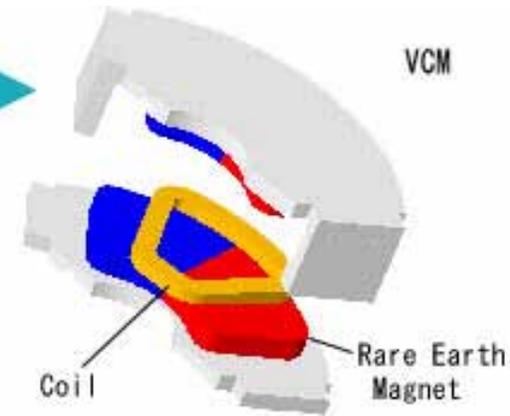
VCM for Hard Disk Drives

More than half of all rare earth magnet products are employed in the VCM (**VoiceCoil Motor**) magnetic circuits used for almost all computer hard disks.



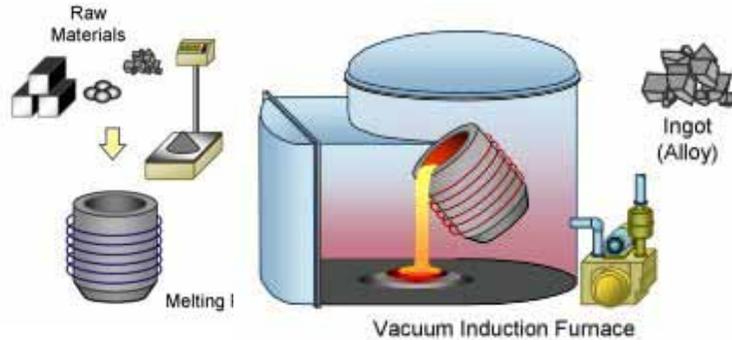
0/Fi

Hard Disk Drive

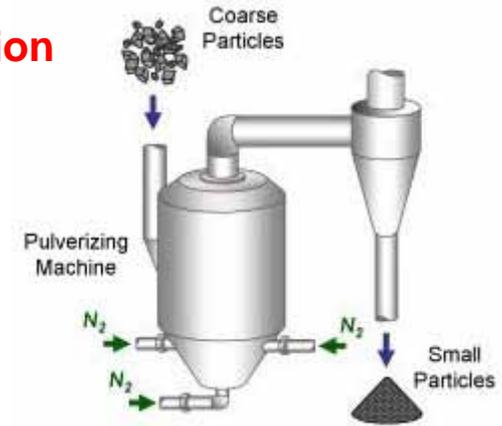


Pulvermetallurgie – Sinter REPM

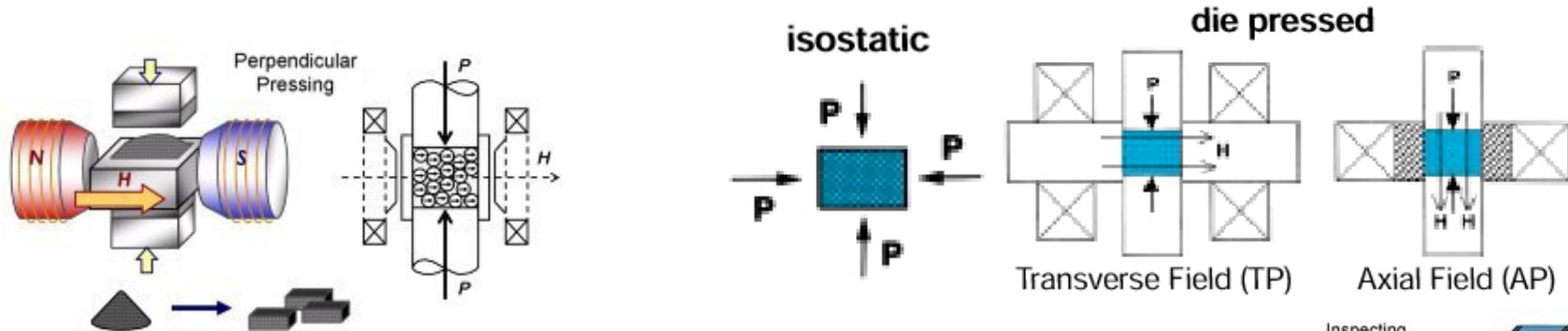
1. Melting of the alloy under vacuum



2. Pulverization



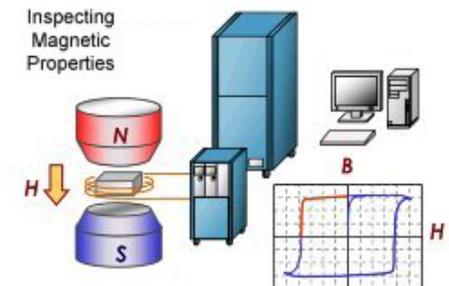
3. Alignment and Compacting in a Magnetic Field



4. Sintering/Annealing

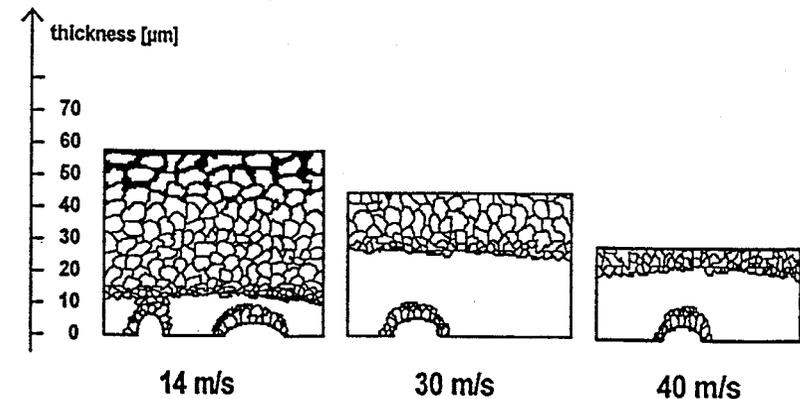
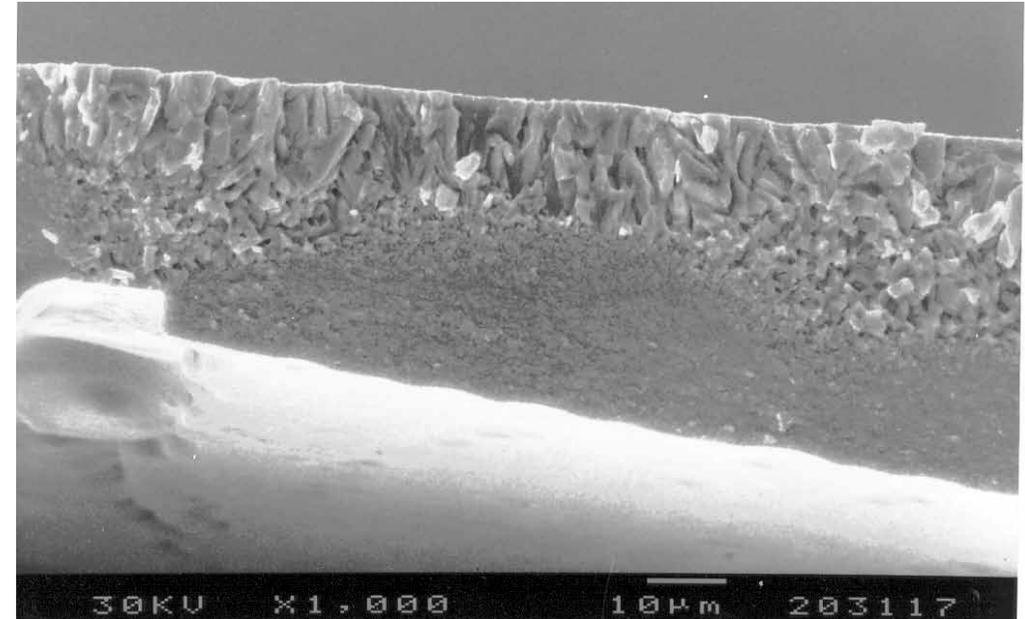
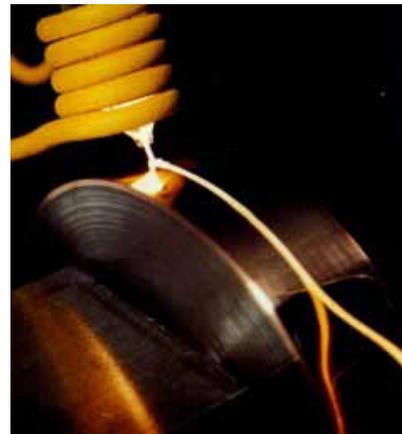
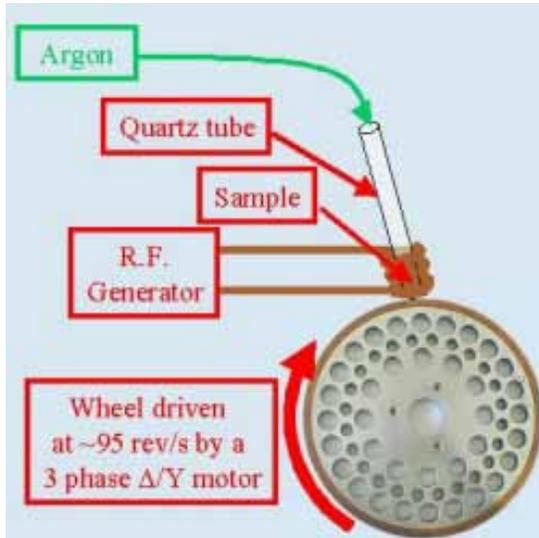


5. Inspecting Magnetic Properties



„Melt-spun Nd-Fe-B“ Magnete

- § Abkühlrate
(„wheel speed“)
- § Wärmebehandlung
(Zeit und Heizrate)
- § Chemische Zusammensetzung

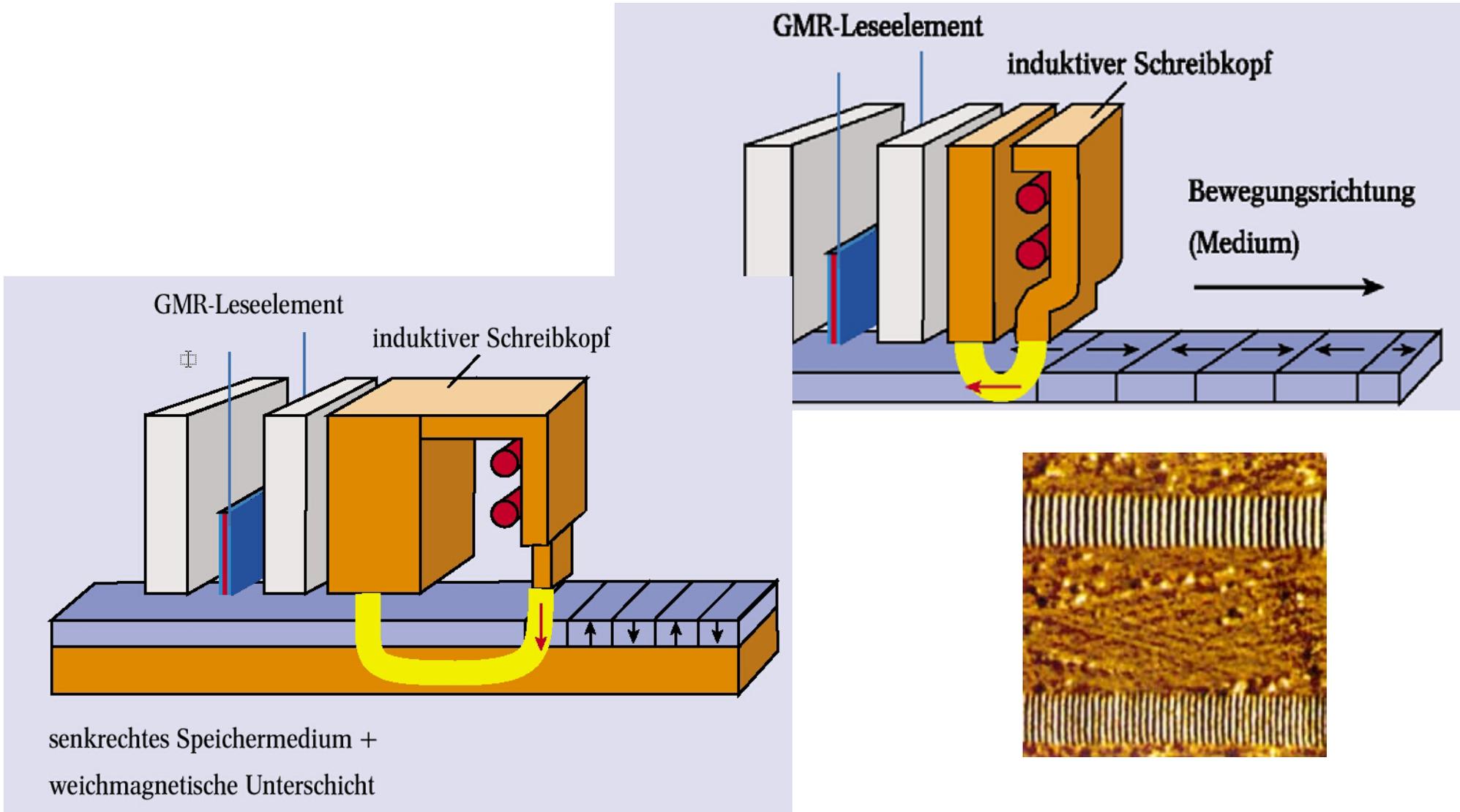


Materialien für die magnetische Aufzeichnung und Datenspeicherung

- § Speichermedien für die Ton-, Bild- und Datenspeicherung:
 - Partikelschichten
 - Metallschichten.
- § Verwendung in Magnetbändern in der **Audio**- und **Videotechnik**, Computertechnik sowie bei Floppy-Disk und auch bei Festplatten.
- § Man unterscheidet zwischen:
 - **digitaler** oder **analoger** Informationsspeicherung
 - Längsaufzeichnung („**longitudinal**“) oder Senkrechtaufzeichnung („**perpendicular**“)
 - **Magnetooptischer** Aufzeichnung

Unterschied zwischen „Longitudinal“ und „Perpendicular recording“

SS10/Fi



Particular recording media (Floppy Disks)

100 MB ZIP

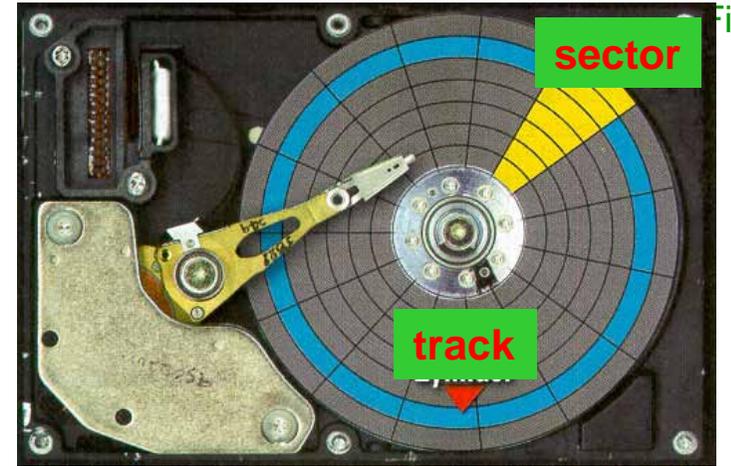
1.44 MB floppy



Flugdatenschreiber – „Black Box“

200 nm

CoCrPtX Hard Disks



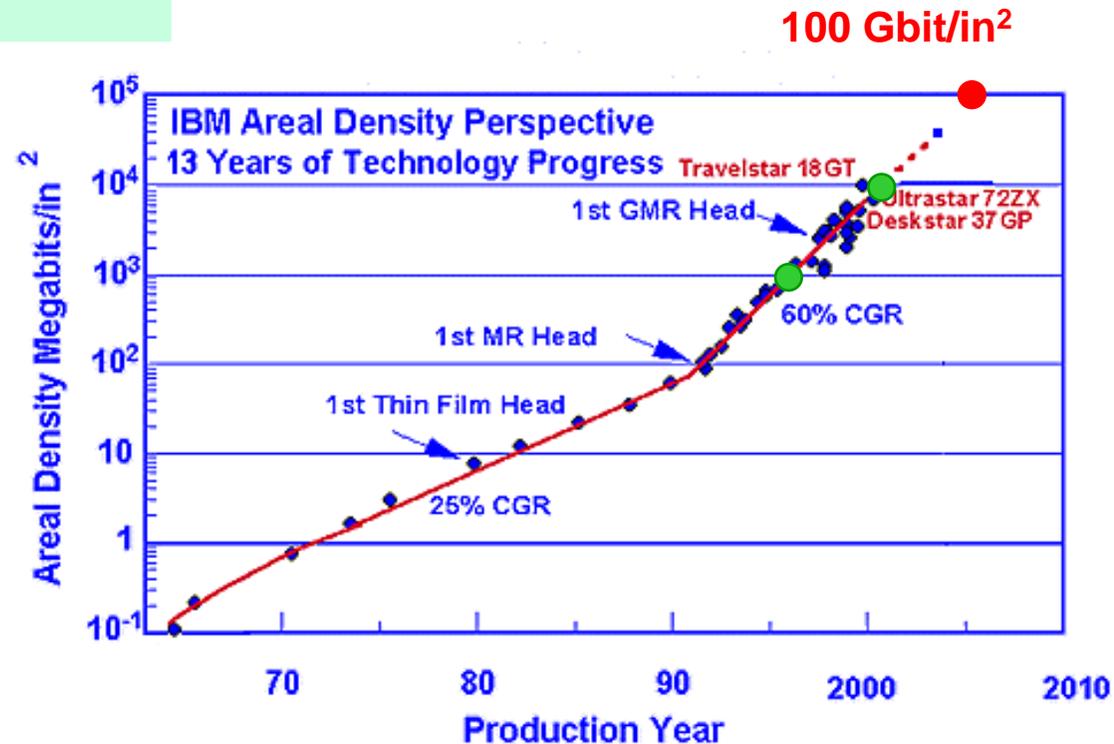
Comparison of Magnetic Bit Sizes

1 Gb/in²
(150 kbp i x 6600 tpi)  150 nm
3.1 μm

10 Gb/in²
(400 kbp i x 25 ktpi)  64 nm
800 nm

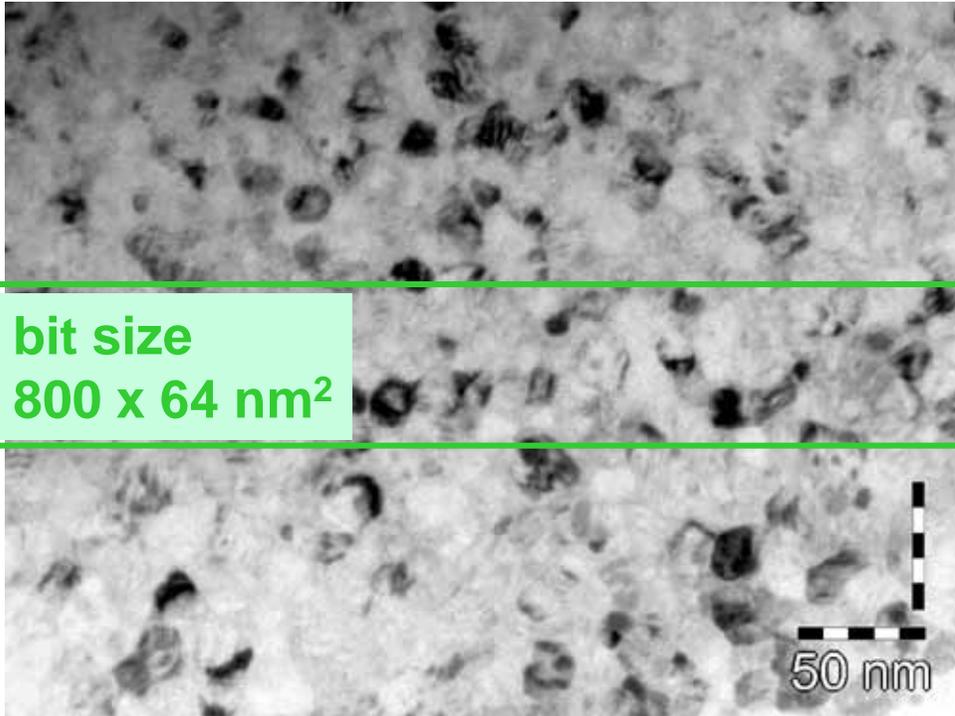
40 Gb/in²
(800 kbp i x 50 ktpi)  32 nm
400 nm

100 Gb/in²
(500 kbp i x 200 ktpi)  45 nm
130 nm



Conventional Hard Disks

10 Gbit/in²



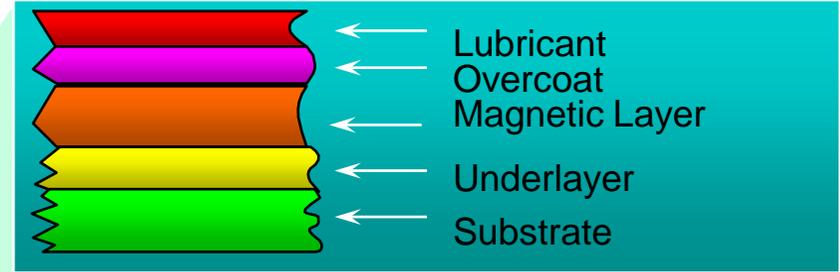
bit size
800 x 64 nm²

Grain size of magnetic layer ~15 nm.

2000



Cross sectional view shows seedlayer, underlayer, intermediate layer, first magnetic layer, interlayer and second magnetic layer. Full thickness of all layers together ~50 nm.



Magnetic layer:

CoCrTa, CoCrPt, CoNiPt, CoCrPtTa, SmCo

Substrate: Al, glass

Underlayer: Cr, NiAl, FeAl, CuZn

(**Seedlayer:** MgO)

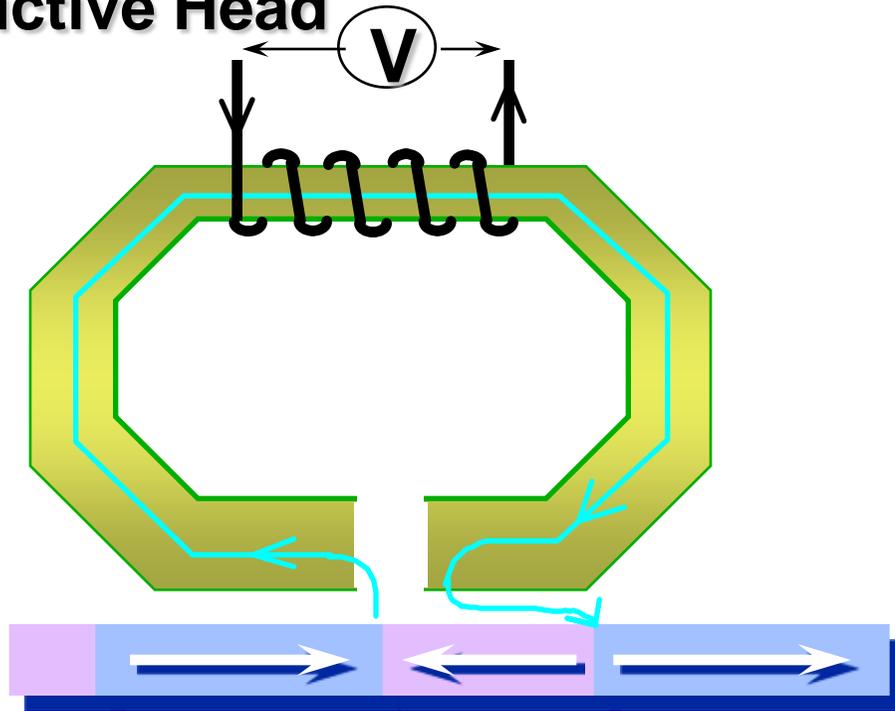
Organic lubricant: 2-3 nm

Magnetic layer: 10-20 nm

Underlayer: 50-100 nm

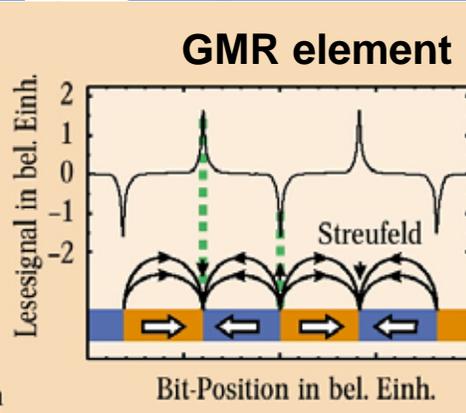
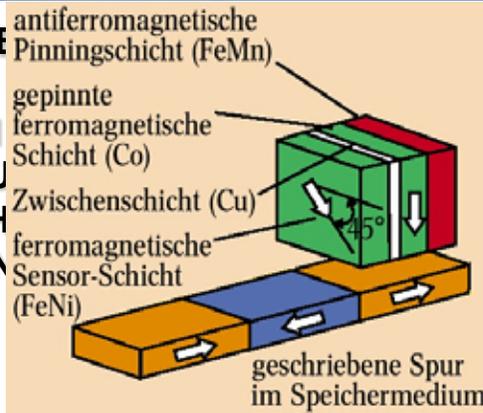
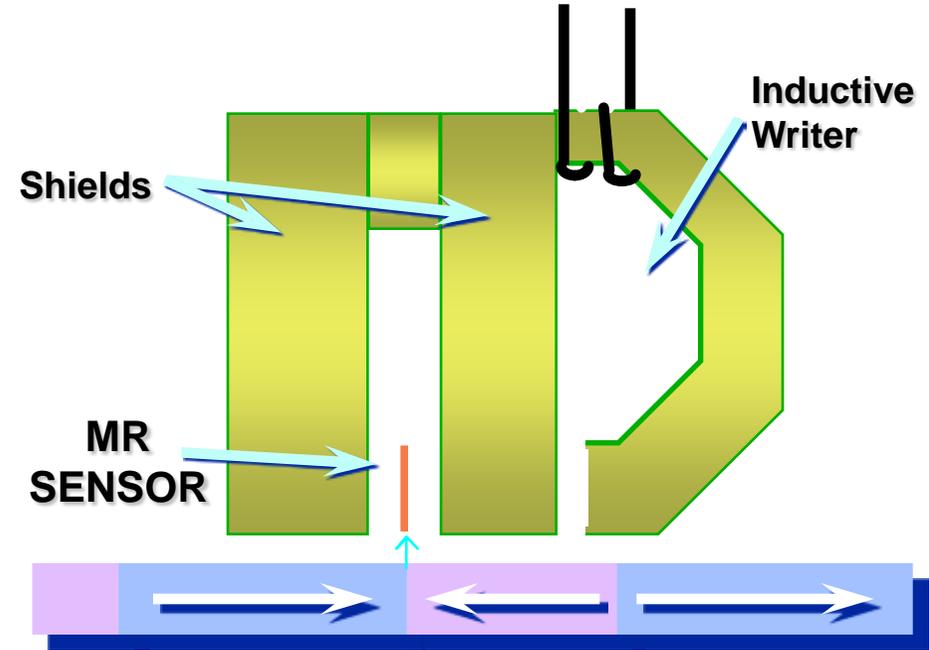
The Readback Process: Inductive vs. MR

Inductive Head



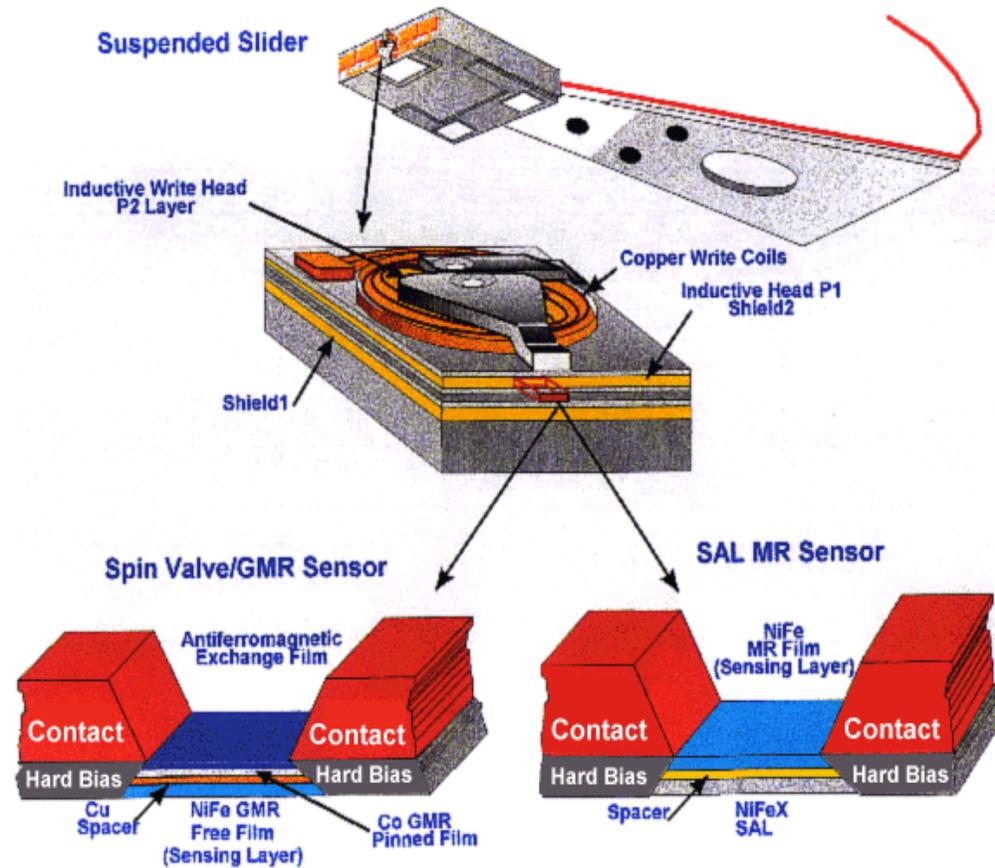
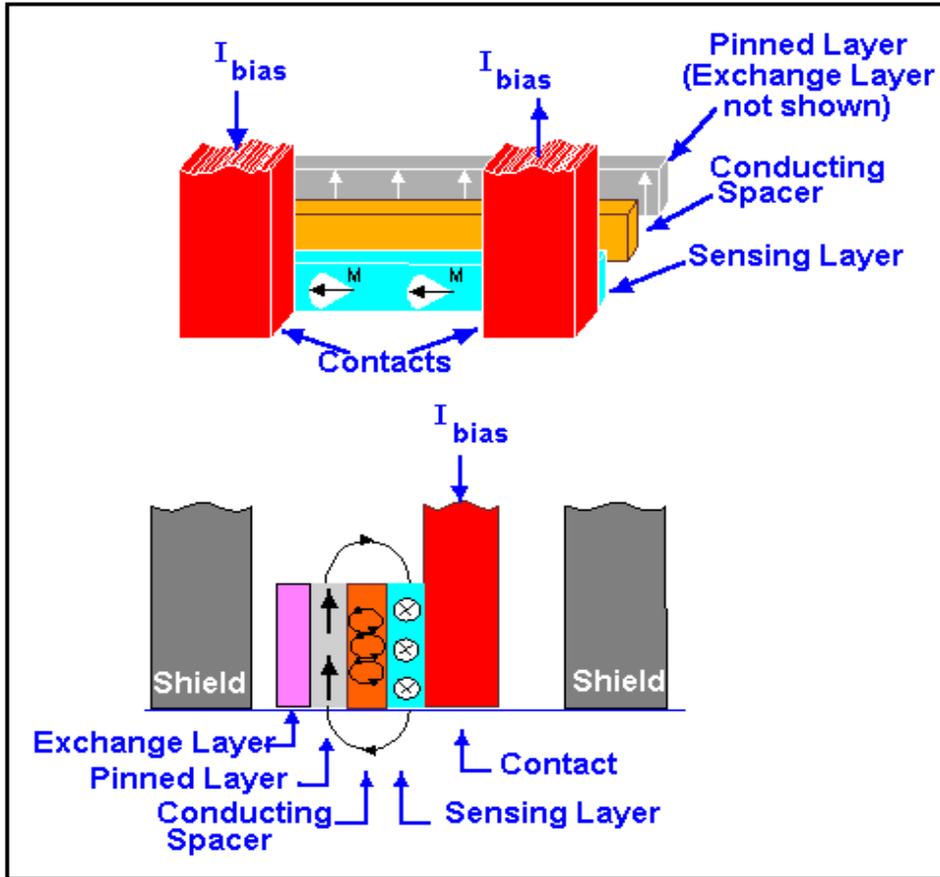
MAGNETIC FIELD FROM THE DISC THREADS THE CORE; THE CHANGING STRENGTH OF THIS MAGNETIC FIELD INDUCES A VOLTAGE, V , ACROSS THE COIL. THE VOLTAGE DEPENDS ON

Magnetoresistive Head



MAGNETIC FIELD FROM THE DISC PASSES THROUGH THE MR SENSOR, WHICH DIRECTLY SENSES THE FIELD. A VOLTAGE IS INDUCED THAT IS PROPORTIONAL TO THE FIELD STRENGTH & INDEPENDENT OF THE DISC SPEED.

Giant-Magneto-Resistive-Head



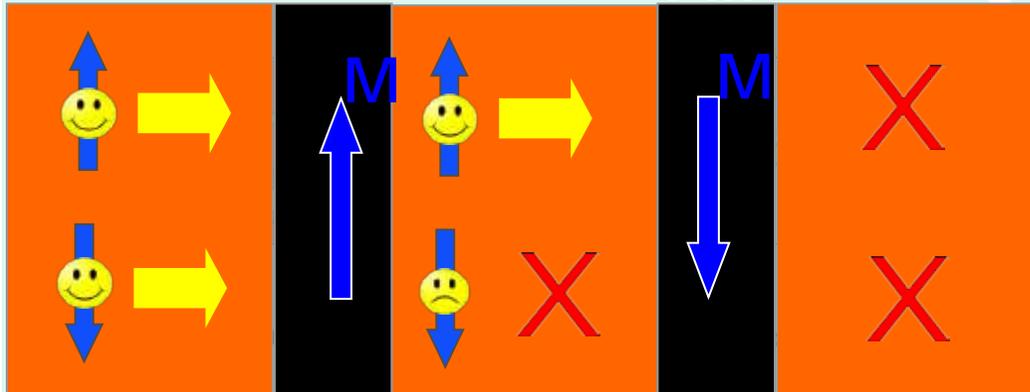
Layered structured films – Spin filter

SS10/Fi

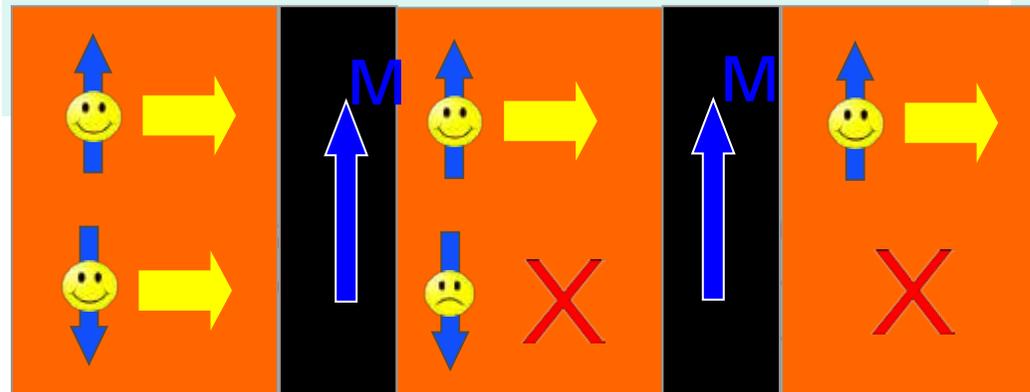
Giant Magneto Resistance (GMR effect)

Concept: interfacial spin-dependent scattering

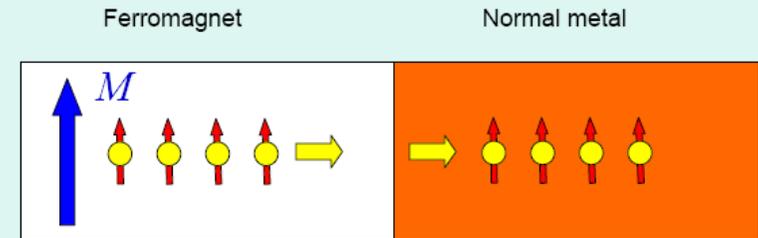
metal FM metal FM metal



→ minority spins are preferentially reflected.



Concept: ferromagnets as spin polarizers



→ "Majority" spins are preferentially transmitted.

Ferromagnetic conductors are relatively permeable for majority spins. Conversely, they are impermeable for minority spins.

„Spin torque for Dummies“

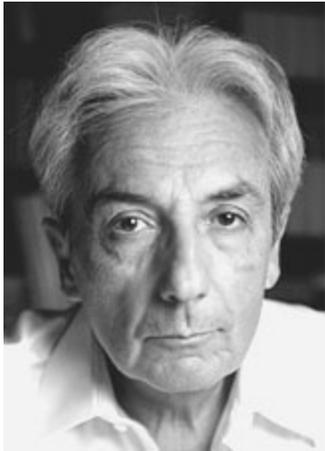
T. Silva, MMM/Intermag 2007, Baltimore, USA

magnetic layers (ns, ps)

Nobelpreis für Physik 2007

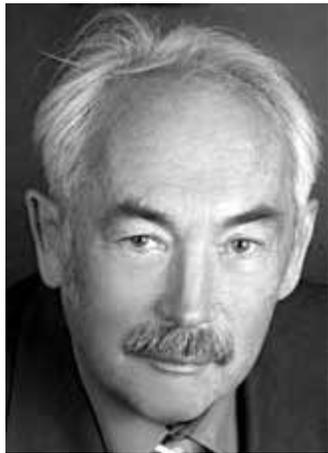


0/Fi



"for the discovery of Giant Magnetoresistance"

Albert Fert



Peter Grünberg

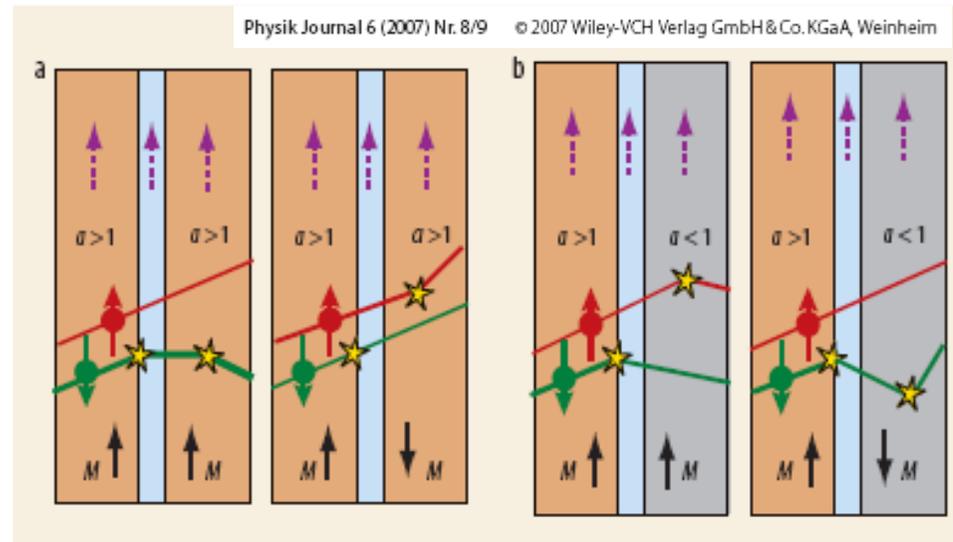


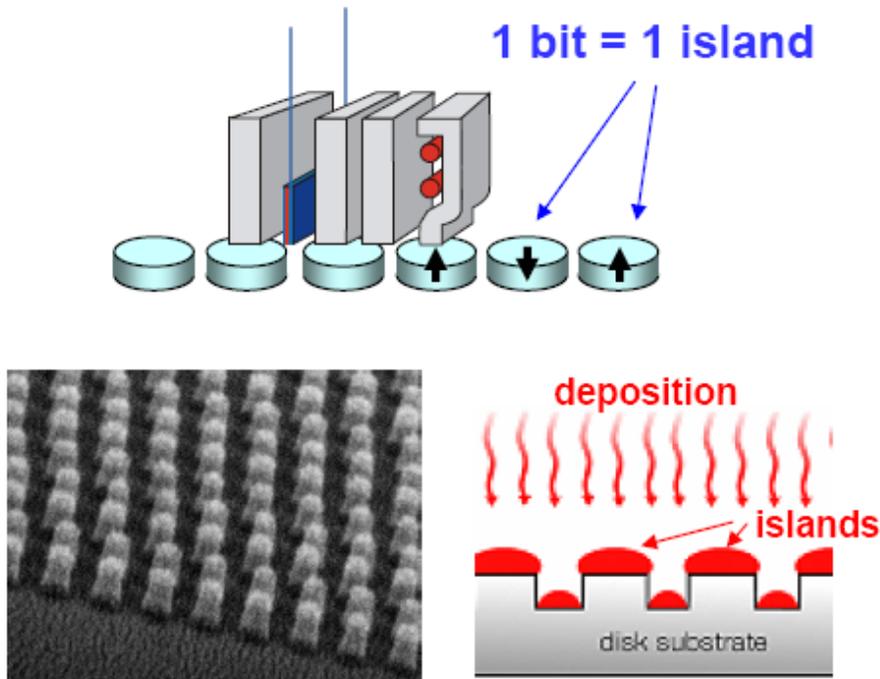
Abb. 5 In dem hier gezeigten idealisierten Modell werden je nach magnetischem Material und Grenzfläche nur Elektronen mit Spin down ($\alpha > 1$) oder Spin up ($\alpha < 1$) gestreut (Streuprozesse sind durch Sterne markiert). Ist α in beiden Schichten kleiner bzw. größer als 1, führt dies zum normalen GMR-Effekt (a). Die Kombination von $\alpha > 1$ und $\alpha < 1$

führt zum inversen GMR-Effekt (b), bei dem $R_p > R_{ap}$ ist. Spinabhängige Grenzflächenreflektivität ist nicht dargestellt, da sie wegen der Translationssymmetrie in der Schichtebene den Elektronenimpuls in Stromrichtung nicht verändert. Für Ströme senkrecht zur Schichtebene trägt neben der Streuung auch die Reflexion zum GMR-Effekt bei.

Beyond conventional recording

Two favorite technology options to extend thermal limit

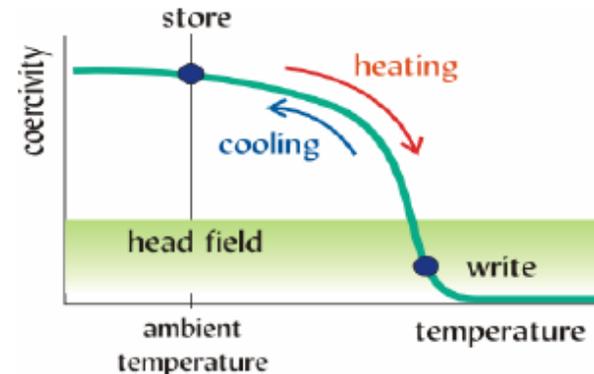
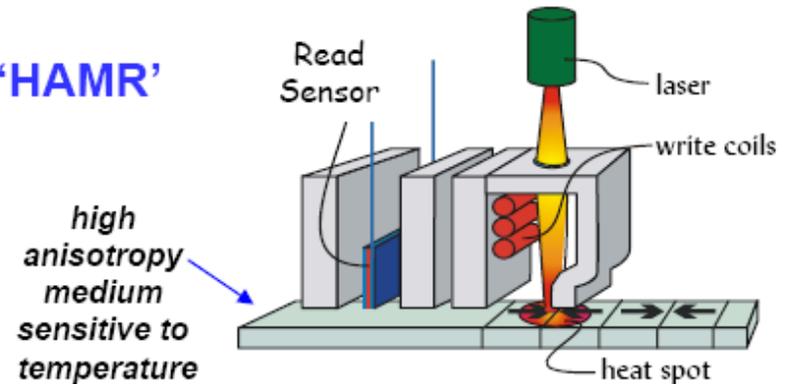
Patterned Media (1 large grain per bit)



Challenges: *Disk Manufacture*
Lithography/Stamping

Thermal Assist (Very high Anisotropy)

'HAMR'



Challenges: *Head Integration*
New Media Development

plus all the engineering challenges of scaling dimensions for >Terabit/in² !